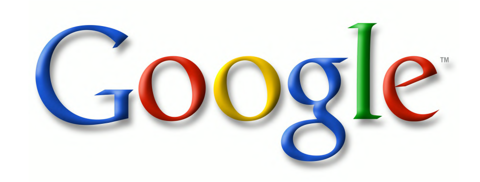
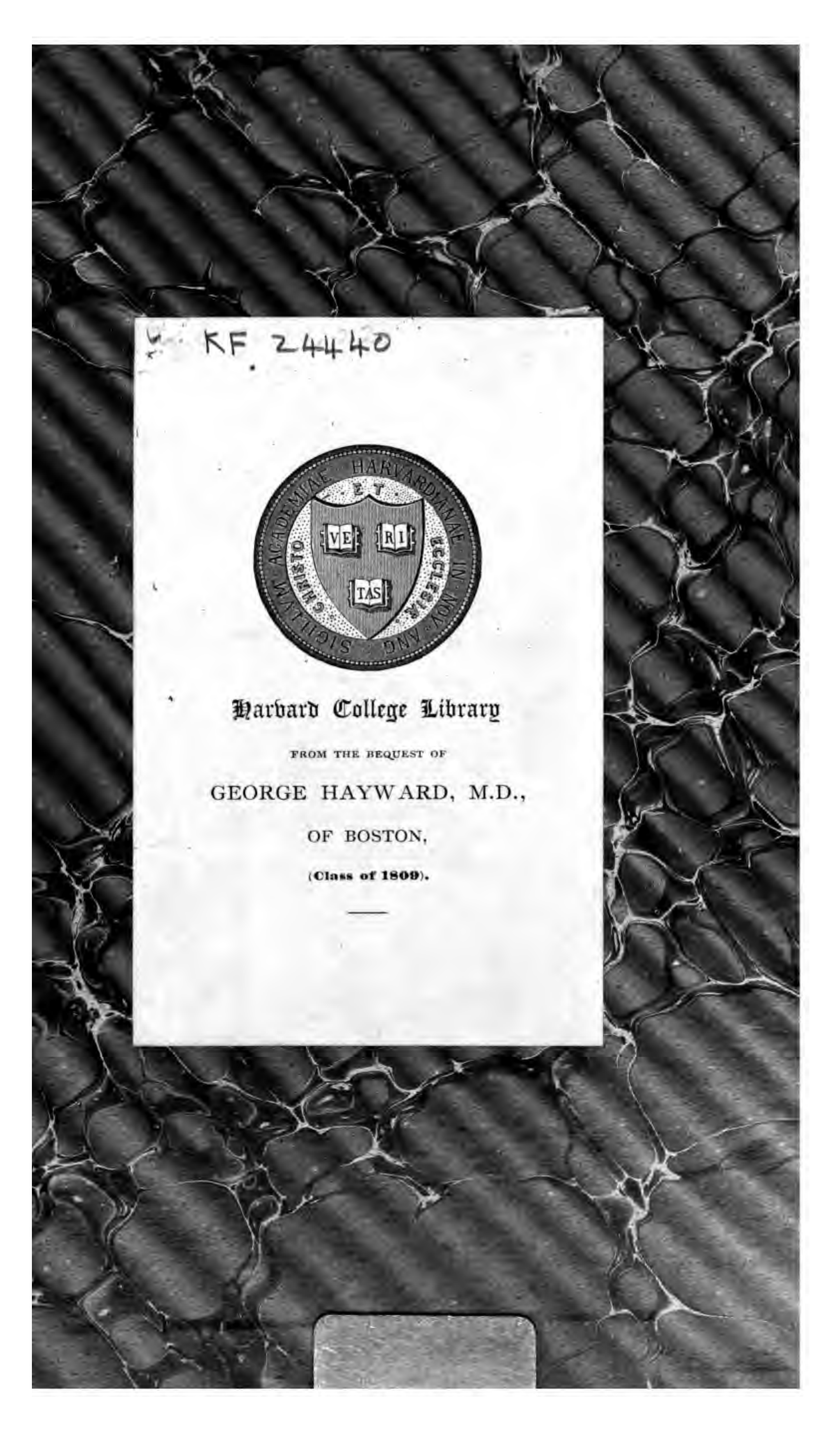
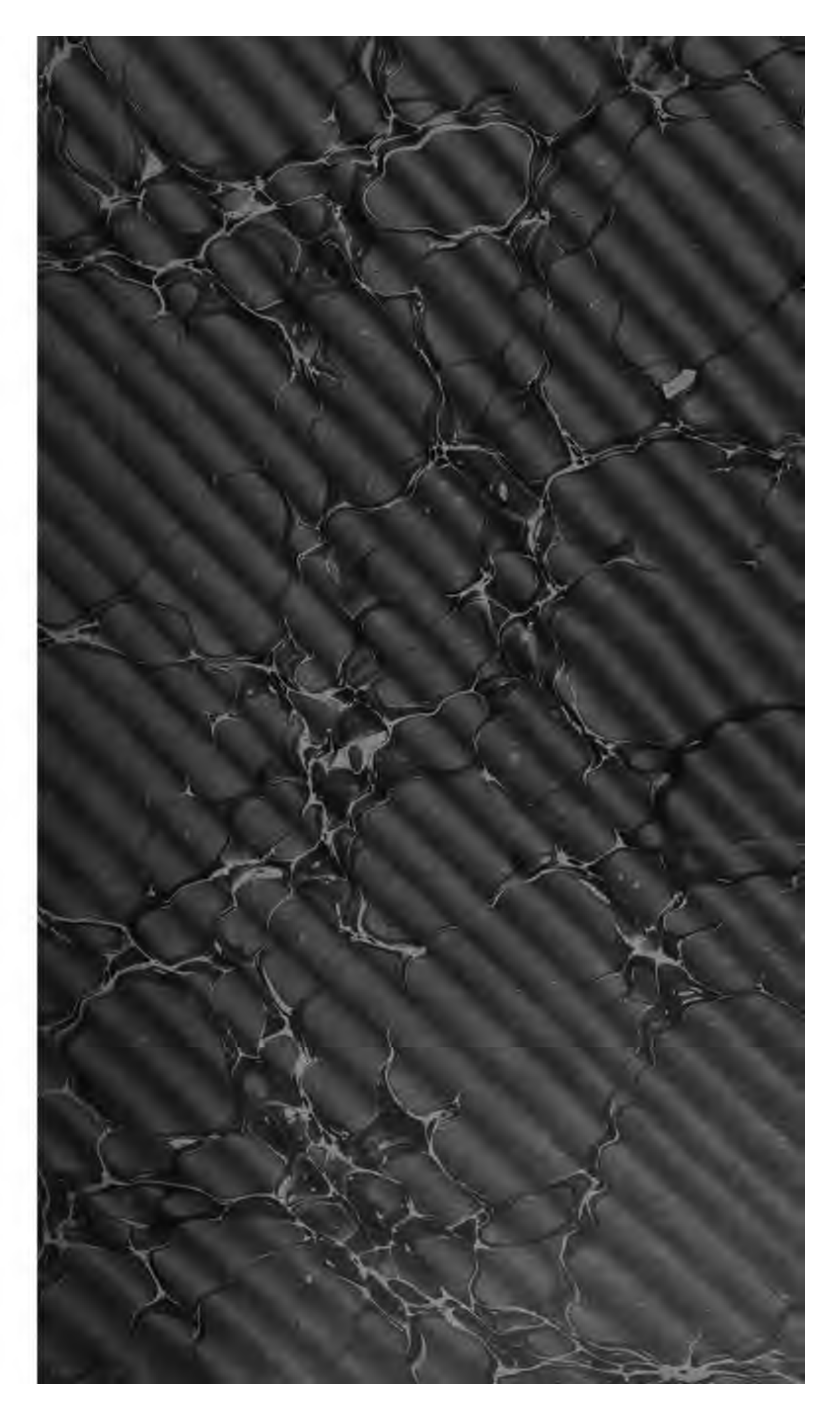



KF
4440
NEDL TRANSFER
HN 4PPQ Y


HARVARDIANAE
ACADEMIAE
SIGILLVM
IN NOV ANG
CHRISTO
ET
ECCLESIAE
VE
RI
TAS



RECHERCHES

DES

LOIS DYNAMIQUES DE L'AIR DANS LES CYCLONES

[illegible]

RECHERCHES

DES

LOIS DYNAMIQUES DE L'AIR DANS LES CYCLONES

ET LEUR APPLICATION

A LA

DÉTERMINATION DE LA ROUTE DE SÉCURITÉ DES NAVIRES

DANS CES OURAGANS

PAR

le Vice-Amiral E.-F. FOURNIER

Membre du Conseil supérieur de la Marine et du Bureau des Longitudes



PARIS

LIBRAIRIE MILITAIRE R. CHAPELOT ET Cie

IMPRIMEURS-ÉDITEURS

30, Rue et Passage Dauphine, 30

1902



RECHERCHE

DES

LOIS DYNAMIQUES DE L'AIR DANS LES CYCLONES

ET LEUR APPLICATION

A LA

DÉTERMINATION DE LA ROUTE DE SÉCURITÉ DES NAVIRES

DANS CES OURAGANS

Ce mémoire est divisé en trois parties principales. Dans la première sont exposées les considérations dynamiques et analytiques de nature à conduire, par les voies les plus simples, à la détermination des lois de la circulation relative de l'air dans les cyclones.

Dans la seconde, se trouvent vérifiées ces lois par l'accord parfait des résultats auxquels elles aboutissent, avec les observations barométriques recueillies dans sept cyclones de diverses régions, et aussi différents que possible en étendue, en durée et en dépression centrale.

Enfin, dans la troisième partie, nous avons expliqué et discuté la construction géométrique très simple qui permettrait au capitaine d'un bâtiment assailli par un cyclone de reconnaître la route qu'il doit suivre pour trouver dans la tempête toute la sécurité compatible avec les qualités nautiques de son bâtiment, la violence de l'ouragan et sa situation relative initiale par rapport à la trajectoire du centre des dépressions.

---

atteint son maximum oscillatoire G, en même temps que sa tension, son minimum ϖ.

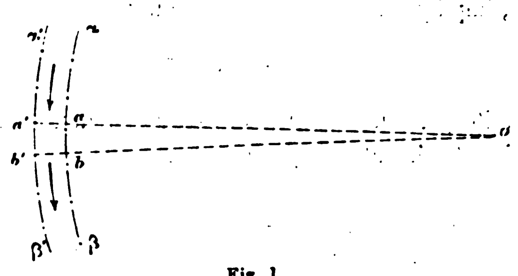


Fig. 1.

Soient : ab et ab' sur un même niveau, les portions élémentaires, de longueurs infinitésimales,

$$ab = ds, \qquad a'b' = ds + \frac{d(ds)}{dR} \cdot dR,$$

de deux files circulaires et concentriques de molécules aériennes animées de leur vitesse giratoire maxima

$$G \quad \text{et} \quad G + \left(\frac{dG}{dR}\right) \cdot dR,$$

sous les pressions minima correspondantes,

$$\varpi \quad \text{et} \quad \varpi + \left(\frac{d\varpi}{dR}\right) \cdot dR,$$

en gravitant sur les arcs circulaires et isobares $\alpha\beta$ et $\alpha'\beta'$, de rayons infiniment peu différents

$$oa = R \quad \text{et} \quad oa' = R + dR,$$

et sur lesquels le baromètre enregistre, d'une façon permanente, les pressions moyennes

$$p \quad \text{et} \quad p + \left(\frac{dp}{dR}\right) \cdot dR.$$

Le volume annulaire infinitésimal ayant pour base le rectangle $abb'a'$ et pour hauteur dz, a pour mesure le produit

$$ds \cdot dz \cdot dR.$$

Si donc on représente par μ_{ϖ} la masse spécifique de l'unité de volume d'air sous sa charge minimum ϖ, la masse de ce volume élémentaire et la force centrifuge dont elle est animée dans sa gravitation circulaire entre les rayons R et R + dR, auront pour expressions

$$\mu_{\varpi} \,.\, ds \,.\, dz \,.\, dR,$$

d'une part, et

$$(\mu_{\varpi} \,.\, ds \,.\, dz \,.\, dR) \,.\, \frac{G^2}{R},$$

de l'autre, en négligeant les infiniment petits des ordres supérieurs au troisième.

On voit, en outre, que la tension transversale ϖ de l'air exerce sur la face latérale interne du volume considéré une charge normale extérieure

$$ds \,.\, dz \,.\, \varpi$$

et sur sa face latérale externe, une charge normale antagoniste dont l'expression est

$$ds \,.\, dz \,.\, \left(\varpi + \frac{d\varpi}{\mu R} \,.\, dR\right).$$

Il résulte donc, de ces deux charges opposées, sur ce volume, une poussée centripète

$$ds \,.\, dz \,.\, \left(\varpi + \frac{d\varpi}{dR} \,.\, dR\right) - ds \,.\, dz \,.\, \varpi$$

ou

$$ds \,.\, dz \,.\, \left(\frac{d\varpi}{dR}\right) dR,$$

tandis qu'il tend à être projeté en dehors de sa trajectoire circulaire par la force centrifuge

$$(\mu_{\varpi} \,.\, ds \,.\, dz \,.\, dR) \,.\, \frac{G^2}{R}.$$

La condition de son équilibre, normalement à cette trajectoire, est donc exprimée par l'équation

$$ds \,.\, dz \,.\, \left(\frac{d\varpi}{dR}\right) \,.\, dR = (\mu_{\varpi} \,.\, ds \,.\, dz \,.\, dR) \,.\, \frac{G^2}{R} \qquad (1)$$

ou, après réduction,

(1) $$\frac{d\varpi}{dR} = \mu_\varpi \cdot \frac{G^2}{R}$$

6. Remarquons maintenant qu'en représentant par

$$v \quad \text{et} \quad p$$

les valeurs moyennes observées de la vitesse giratoire et de la tension de l'air qui oscillent périodiquement, au même point, entre les limites

$$G \quad \text{et} \quad \varpi,$$

d'une part, et,

$$o \quad \text{et} \quad \Pi,$$

de l'autre, on a évidemment

$$v = \tfrac{1}{2}(G + o) \quad \text{et} \quad p = \tfrac{1}{2}(\varpi + \Pi),$$

d'où,

$$G = 2v \quad \text{et} \quad \varpi = 2p - \Pi.$$

En substituant alors ces expressions dans l'équation précédente, celle-ci devient, après réduction,

$$\frac{dp}{dR} = 2 \cdot \mu_\varpi \cdot \frac{v^2}{R},$$

ou

(2) $$\frac{dp}{dR} = 2K(2p - \Pi) \cdot \frac{v^2}{R},$$

à cause de la formule de Mariotte, $\mu_\varpi = K\varpi$, et de l'expression précédente de $\varpi = 2p - \Pi$.

Mais l'équation (2) peut être simplifiée, car on peut poser

$$2p - \Pi = p - (\Pi - p) = p\left(1 - \frac{\Pi - p}{p}\right),$$

et comme on a

$$Kp = \mu_p,$$

d'après la formule de Mariotte, cette expression peut s'écrire

(3) $$\frac{dp}{dR} = 2 \cdot \mu_p \cdot \frac{v^2}{R}\left(1 - \frac{\Pi - p}{p}\right),$$

ou plus simplement

$$\frac{dp}{dR} = 2 \cdot \frac{\mu_p v^2}{R} = \frac{\Pi - p}{R}, \tag{4}$$

puisque $2 \cdot \mu_p v^2 = \Pi - p$, avec une approximation relative suffisante par rapport à celle que comporte le peu de précision des données de l'observation, le rapport $\frac{\Pi - p}{p}$, négligé dans l'équation (3), ne dépassant pas, dans les cyclones,

$$0{,}04,$$

entre les limites du champ d'application de cette équation.

Limites d'application de l'équation différentielle (4).

7. Dans le fluide atmosphérique, dont la viscosité est négligeable et l'élasticité parfaite, les frottements intérieurs peuvent être considérés comme nuls. C'est donc seulement par les oscillations verticales des molécules aériennes les mélangeant alternativement, d'un niveau à l'autre, que les forces vives de l'entraînement giratoire se transmettent, du tourbillon générateur du cyclone, au niveau terrestre. Ces forces vives s'affaiblissent ainsi graduellement sur leur parcours vertical de même longueur et d'autant plus rapidement qu'elles sont plus faibles à leur origine. Celles qui émanent du bord extérieur du tourbillon générateur ne parviennent donc pas jusqu'au niveau terrestre, et il en résulte que l'entraînement giratoire ne commence, dans ce niveau, que sur un isobare de rayon R_1 des pressions barométriques p_1, toujours inférieur à l'isobare des pressions culminantes Π qui est la projection verticale du contour du tourbillon générateur.

On a donc, dans tous les cyclones, la relation générale

$$p_1 < \Pi.$$

D'autre part, l'expérience a montré que l'entraînement giratoire de l'air cesse à peu près brusquement, dans toutes ces tempêtes, après qu'il a atteint sa rapidité maximum, sur un isobare de rayon R_0, des pressions barométriques p_0, à la lisière du noyau central d'ac-

calmie que l'on rencontre au cœur de tous les cyclones et dans lequel la pression barométrique atteint son minimum.

L'équation (4) qui caractérise, sur le niveau terrestre, la loi de progression de l'entraînement giratoire, à mesure que l'observateur se rapproche de l'axe de révolution du météore, n'est donc pas applicable en dedans de l'isobare de rayon R_0 des pressions p_0, ni en dehors de l'isobare de rayon R_1 des pressions p_1, où la circulation relative et la tension de l'air aboutissent, par les déperditions progressives d'un régime de transition instable, irrégulier ou tumultueux, d'une part, au noyau central d'accalmie et à la pression barométrique minimum, d'autre part, au rétablissement de l'équilibre statique extérieur et à la pression barométrique maximum.

C'est donc seulement entre les limites R_0 et p_0, R_1 et p_1, que l'on doit intégrer l'équation différentielle

$$\frac{dp}{\Pi - p} = \frac{dR}{R},$$

qui donne alors l'intégrale définie

$$\frac{\Pi - p}{\Pi - p_0} = \frac{R_0}{R}, \quad \text{ou} \quad \frac{\Pi - p}{\Pi - p_1} = \frac{R_1}{R},$$

c'est-à-dire une relation du type

$$\text{(II)} \qquad \Pi - p = \frac{C}{R},$$

dans laquelle C représente le produit caractéristique constant

$$C = (\Pi - p_0) \,.\, R_0 = (\Pi - p_1) \,.\, R_1$$

dépendant des limites de l'entraînement giratoire direct du tourbillon sur le niveau terrestre.

Expression de la vitesse v en fonction de la baisse barométrique $\Pi - p$.

8. L'application de ces lois nouvelles à la navigation rend nécessaire la construction d'une table donnant, à vue, les valeurs en mètres, à la seconde, de la vitesse v de la circulation relative de l'air

sur la base d'un cyclone, qui correspondent aux valeurs observées de la baisse barométrique $\Pi - p$. La formule ayant servi au calcul des chiffres de cette table (v) a été déduite de la loi

$$\Pi = p + 2 \, . \, \mu v^2$$

par les transformations suivantes :

On déduit de cette relation et de la formule de Mariotte, l'expression

$$v = \sqrt{\tfrac{1}{2} \, . \, \frac{\Pi - p}{Kp}}$$

qui devient, en posant identiquement

$$p = P - (P - p) = P \, . \left(1 - \frac{P - p}{P}\right),$$

en fonction de la pression atmosphérique P mesurée par le poids de la colonne mercurielle du baromètre, de 760 millimètres de hauteur,

$$v = \sqrt{\tfrac{1}{2} \, . \, \frac{\Pi - p}{KP} \, . \, \frac{1}{1 - \frac{P - p}{P}}},$$

ou simplement

$$(5) \qquad v = \sqrt{\tfrac{1}{2} \, . \, \frac{\Pi - p}{KP}},$$

avec une erreur relative moindre que

$$0{,}02,$$

et par conséquent négligeable, puisque le rapport $\frac{P - p}{P}$ ne dépasse pas 0,04 environ dans les cyclones, entre les limites d'application de la relation (1).

Mais KP est, d'après la formule de Mariotte, la mesure de la masse du mètre cube d'air sous la pression P et dont le poids est, à la température moyenne de 15°,

$$\frac{1^{k}{,}2932}{1 + 0{,}00367 \times 15}.$$

On a donc, en représentant par $g = 9^{m}{,}81$ l'accélération de la pesanteur,

$$KP = \frac{1}{g} \, . \, \frac{1^{k}{,}2932}{1 + 0{,}00367 \times 15}.$$

Remarquons enfin que, H et h étant les hauteurs, en millimètres, des colonnes mercurielles du baromètre dont les poids mesurent les pressions atmosphériques Π et p, et le poids du mètre cube de mercure à la température de 15° étant de 13550^k, on a

$$\Pi = 13550^k . \left(\frac{H}{1000}\right) \quad \text{et} \quad p = 13550^k . \left(\frac{h}{1000}\right).$$

En transportant alors dans la formule (5) ces expressions de KP, Π et p, celle-ci devient

$$v = \sqrt{\tfrac{1}{2} \times 9^m,81 \times \frac{13,550^k}{1^k,293} \times (1 + 0,00367 \times 15) . (H - h)},$$

ou, sous la forme logarithmique,

$$\text{(6)} \qquad \log v = 0,86758 + \tfrac{1}{2} . \log (H - h).$$

DEUXIÈME PARTIE.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DE LA LOI DE DISTRIBUTION DES PRESSIONS BAROMÉTRIQUES SUR LA BASE D'UN CYCLONE.

---

9. Pour vérifier expérimentalement et numériquement la loi (II)

$$\text{(II)} \qquad \Pi - p = \frac{C}{R},$$

Fig. 1.

nous avons employé la méthode suivante :

Soit : O, le centre des dépressions de la base d'un cyclone, à

l'époque t où sa distance à la position fixe M de l'observateur stationnaire est OM = R ;

O_0, la position de ce centre à l'époque ultérieure t_0 où il se trouve ensuite à la plus courte distance $O_0 M = r$ du point M.

Si V est la vitesse de translation commune à tous les points du météore et que l'on peut considérer comme uniforme pendant une période suffisamment restreinte, on a les relations géométriques

$$OO_0 = V \cdot (t_0 - t)$$

et

$$R^2 = r^2 + V^2 \cdot (t_0 - t)^2.$$

Substituons à R et à r leurs valeurs déduites de la loi (II), cette seconde relation devient

$$(7) \qquad \frac{C^2}{(\Pi - p)^2} = \frac{C^2}{(\Pi - p'_0)^2} + V^2 \cdot (t_0 - t)^2$$

en représentant par p'_0 la pression barométrique minima observée à l'époque t_0.

Multiplions les deux membres de cette relation par le rapport constant $\frac{\Pi^2}{C^2}$, elle deviendra

$$\frac{\Pi^2}{(\Pi - p)^2} = \frac{\Pi^2}{(\Pi - p'_0)^2} + \frac{V^2 \Pi^2}{C^2} \cdot (t_0 - t)^2.$$

Soit, maintenant, L une longueur arbitraire définissant l'échelle de la représentation graphique à donner de cette relation. En multipliant les deux membres de la formule précédente par L, elle devient

$$(8) \qquad L \cdot \frac{\Pi^2}{(\Pi - p)^2} = L \cdot \frac{\Pi^2}{(\Pi - p'_0)^2} + L \cdot \frac{V^2 \Pi^2}{C^2} \cdot (t_0 - t_0)^2.$$

Considérons comme ordonnées verticales du lieu géométrique dont cette relation est l'équation en coordonnées rectangulaires, les valeurs du premier terme $L \cdot \frac{\Pi^2}{(\Pi - p)^2}$ et posons, à l'échelle caractérisée par la longueur L

$$L \cdot \frac{\Pi^2}{(\Pi - p)^2} = y.$$

En représentant de même par y_0 l'ordonnée mesurant, à l'échelle L et à l'époque t_0, le terme $L.\frac{\Pi^2}{(\Pi - p'_0)^2}$, on aura

$$L.\frac{\Pi^2}{(\Pi - p'_0)^2} = y_0.$$

Si enfin, on adopte, à l'échelle caractérisée par une autre longueur arbitraire λ, comme abscisse horizontale correspondante à l'ordonnée y, l'expression $\lambda.(t_0 - t)^2$, dans laquelle $t_0 - t$ est le nombre d'heures que dure le trajet OO_0 du centre des dépressions, à la vitesse V, on aura, en outre

$$\lambda.(t_0 - t)^2 = x.$$

L'équation du lieu géométrique représentant les relations (7) ou (8) sera donc de la forme

$$y = y_0 + \left(\frac{L}{\lambda}.\frac{\Pi^2}{C^2}.V^2\right)x$$

et comme y_0 et $\frac{L}{\lambda}.\frac{\Pi^2}{C^2}.V^2$ sont des constantes, pour une position fixe de l'observateur sur le niveau terrestre, ce lieu géométrique sera une ligne droite, si la loi

(III) $$\Pi - p = \frac{C}{R}$$

est exacte.

On voit, de plus, que cette ligne droite devra jouir de la propriété d'être inclinée sur l'axe des abscisses d'un angle I dont l'expression est donnée par la formule

$$\text{tang } I = \left(\frac{L}{\lambda}.\frac{\Pi^2}{C^2}.V^2\right),$$

et qui, ne dépendant que des constantes caractéristiques du cyclone Π, C, V et des échelles du graphique, doit être le même quelle que soit la position relative invariable de l'observateur sur la base du météore, dont dépend cependant l'autre constante y_0 par le paramètre p'_0 de son expression $\frac{\Pi^2}{(\Pi - p'_0)^2}$, puisque la pression minimum p'_0 est d'autant plus petite que l'observateur est plus rapproché de la trajectoire centrale du tourbillon.

Cette remarque est importante parce qu'elle nous conduira à une vérification particulièrement probante de la loi (II).

Les valeurs numériques de y et de x sont données par les tables I et II calculées avec des valeurs arbitraires de L et λ, choisies de manière à limiter les longueurs de ces coordonnées aux dimensions d'une feuille de papier ordinaire.

La vérification de la loi $\Pi - p = \frac{C}{R}$ consiste donc à construire, sur des axes rectangulaires, le lieu géométrique des points qui ont pour abscisses les nombres x de la table II, et pour ordonnées, les nombres correspondants y de la table I, en entrant dans ces tables avec les valeurs successives de $\Pi - p$ et de $t_0 - t$ recueillies d'heure en heure, sur la base d'un cyclone, par un obrervateur stationnaire, pendant le passage de la partie antérieure du tourbillon.

Si cette loi est exacte et générale, ce lieu géométrique doit être une ligne droite quelle que soit la courbe barométrique qui a fourni les éléments de ses coordonnées. De plus, l'inclinaison I de cette droite sur l'axe des abscisses doit être indépendante de la position relative de l'observateur, et par conséquent elle doit être identique pour les courbes barométriques les plus différentes, si elles ont été relevées simultanément de divers points de la base d'un même cyclone par plusieurs observateurs stationnaires.

J'ai appliqué ce procédé de vérification graphique très commode à sept courbes barométriques recueillies par des observateurs stationnaires dans des cyclones de la mer des Indes, des mers de Chine et du golfe des Antilles et, pour donner à ses résultats un caractère de généralité incontestable, j'ai tenu à prendre pour exemple, sans distinction, toutes les courbes barométriques dont j'ai pu trouver les éléments dans les ouvrages de la bibliothèque du bâtiment le *Lynx* où cette opération fut faite, à Tien-Tsin.

Il suffit de jeter un coup d'œil sur les sept tracés obtenus par cette méthode sur les planches annexées à ce mémoire pour constater qu'ils présentent tous un développement parfaitement rectiligne du lieu géométrique d'épreuve, malgré la variété complète des types de courbes barométriques dont ce lieu géométrique dérive.

Cette vérification si frappante est complétée encore par les résultats des planches I et II. Sur ces deux planches, en effet, les deux courbes barométriques, quoique très différentes, devaient conduire

cependant à des valeurs identiques de l'inclinaison I des droites d'épreuve correspondantes et se rapporter à une même valeur de la constante Π, puisqu'elles avaient été relevées, dans un même typhon, la première, par un observateur stationnant à Hong-Kong, la seconde par un observateur stationnant à Macao. Or, on a trouvé précisément :

$$\Pi = 750^{mm},1 \quad \text{et} \quad I = 32^{\circ} \quad \text{dans le premier exemple,}$$

et :

$$\Pi = 749^{mm},6 \quad \text{et} \quad I = 31^{\circ}20' \quad \text{dans le second exemple,}$$

valeurs que l'on peut considérer, en effet, comme identiques, en tenant compte de l'approximation avec laquelle on pouvait espérer obtenir ces résultats, en les déduisant d'observations barométriques même les plus précises.

En définitive, ces exemples montrent que, dans les cyclones de toutes les régions du globe, soit que la baisse barométrique absolue $\Pi - p$ atteigne 50^{mm}, soit qu'elle ne dépasse pas 12^{mm}, soit qu'elle s'effectue en plus de vingt heures ou seulement en cinq ou six heures, elle varie toujours, dans la partie antérieure de la base du tourbillon, entre les limites de l'entraînement giratoire direct, en raison inverse de la distance de l'observateur au centre des dépressions, quel qu'y soit le régime des vents apparents, conformément à la loi

$$\Pi - p = \frac{C}{R}.$$

TABLE I.

Valeurs des ordonnées Y, de la droite d'épreuve.

H — h.	0 m/m, 0.	0 m/m, 1.	0 m/m, 2.	0 m/m, 3.	0 m/m, 4.	0 m/m, 5.	0 m/m, 6.	0 m/m, 7.	0 m/m, 8.	0 m/m, 9.	H — h.
3 m/m	555,5	520,2	488,2	457,0	432,5	408,1	385,8	365,2	346,2	328,7	3 m/m
4	312,5	297,4	283,4	270,4	258,2	246,9	236,2	226,3	217,0	208,2	4
5	200,0	192,2	184,9	178,0	171,5	165,3	159,4	153,9	148,6	143,6	5
6	138,9	134,4	130,1	126,0	122,1	118,3	114,8	111,4	108,1	105,0	6
7	102,0	99,2	96,4	93,8	91,3	88,9	86,6	84,3	82,2	80,1	7
8	78,1	76,2	74,4	72,6	70,9	69,2	67,6	66,1	64,6	63,1	8
9	61,7	60,4	59,1	57,8	56,6	55,4	54,2	53,1	52,1	51,0	9
10	50,0	49,0	48,1	47,1	46,2	45,3	44,5	43,7	42,9	42,1	**10**
11	41,3	40,6	39,9	39,2	38,5	37,8	37,2	36,5	35,9	35,3	11
12	34,7	34,1	33,6	33,0	32,5	32,0	31,5	31,0	30,5	30,0	12
13	29,6	29,1	28,7	28,3	27,8	27,4	27,0	26,6	26,3	25,9	13
14	25,5	25,1	24,8	24,4	24,1	23,8	23,4	23,1	22,8	22,5	14
15	22,2	21,9	21,6	21,4	21,1	20,8	20,5	20,3	20.0	19,8	15
16	19,5	19,3	19,0	18,8	18,6	18,4	18,1	17,9	17,7	17,5	16
17	17,3	17,1	16,9	16,7	16,5	16,3	16,1	16,0	15,8	15,6	17
18	15,4	15,3	15,1	14,9	14,8	14,6	14,4	14,3	14,1	14,0	18
19	13,8	13,7	13,6	13,4	13,3	13,1	13,0	12,9	12,7	12,6	19
20	12,5	12,4	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,7	11,6	11,4	**20**
21	11,3	11,2	11,1	11,0	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5	10,4	21
22	10,3	10,2	10,1	10,0	10,0	9,9	9,8	9,7	9,6	9,5	22
23	9,4	9,4	9,3	9,2	9,1	9,0	9,0	8,9	8,8	8,7	23
24	8,7	8,6	8,5	8,5	8,4	8,3	8,3	8,2	8,1	8,1	24
25	8,0	7,9	7,9	7,8	7,8	7,7	7,6	7,6	7,5	7,5	25
26	7,4	7,3	7,3	7,2	7,2	7,1	7,1	7,0	7,0	6,9	26
27	6,9	6,8	6,8	6,7	6,7	6,6	6,6	6,5	6,5	6,4	27
28	6,4	6,3	6,3	6,2	6,2	6,2	6,1	6,1	6,0	6,0	28
29	5,9	5,9	5,9	5,8	5,8	5,7	5,7	5,7	5,6	5,6	29
30	5,6	5,5	5,5	5,4	5,4	5,4	5,3	5,3	5,3	5,2	**30**
31	5,2	5,2	5,1	5,1	5,1	5,0	5,0	5,0	4,9	4,9	31
32	4,9	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	32
33	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,3	33
34	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	4,1	34
35	4,1	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,9	3,9	3,9	35
36	3,9	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	36
37	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	37
38	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3	38
39	3,3	3,3	3,2	3,2	3.2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	39
40	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	**40**
41	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	41
42	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	42
43	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	43
44	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	44
45	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	45
46	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	46
47	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	47
48	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	48
49	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	49
50	2,0	»	»	»	»	»	»	»	»	»	**50**

TABLE II.

donnant les valeurs des abscisses X de la droite d'épreuve.

VALEUR DES CARRÉS DES HEURES ET DIXIÈMES D'HEURES.

ARGUMENT vertical.	ARGUMENT HORIZONTAL, DIXIÈMES D'HEURES.										ARGUMENT vertical.
	0 h. 0.	0 h. 1.	0 h. 2.	0 h. 3.	0 h. 4.	0 h. 5.	0 h. 6.	0 h. 7.	0 h. 8.	0 h. 9.	
heures											heures
0	0,0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	0
1	1,0	1,21	1,44	1,69	1,96	2,25	2,56	2,89	3,24	3,61	1
2	4,0	4,41	4,84	5,29	5,76	6,25	6,76	7,29	7,84	8,41	2
3	9,0	9,61	10,24	10,89	11,56	12,25	12,96	13,69	14,44	15,21	3
4	16,0	16,81	17,64	18,49	19,36	20,25	21,16	22,09	23,04	24,01	4
5	25,0	26,01	27,04	28,09	29,16	30,25	31,36	32,49	33,64	34,81	5
6	36,0	37,21	38,44	39,69	40,96	42,25	43,56	44,89	46,24	47,61	6
7	49,0	50,41	51,84	53,29	54,76	56,25	57,76	59,29	60,84	62,41	7
8	64,0	65,61	67,24	68,89	70,56	72,25	73,96	75,69	77,44	79,21	8
9	81,0	82,81	84,64	86,49	88,36	90,25	92,16	94,09	96,04	98,01	9
10	100,0	102,01	104,04	106,09	108,16	110,25	112,36	114,49	116,64	118,81	10
11	121,0	123,21	125,44	127,69	129,96	132,25	133,56	136,89	139,24	141,61	11
12	144,0	146,41	148,84	151,29	153,76	156,25	158,76	161,29	163,84	161,41	12
13	169,0	171,61	174,24	176,89	179,56	182,25	184,96	187,69	190,44	193,21	13
14	196,0	198,81	201,64	204,49	207,36	210,25	213,16	216,09	219,04	222,01	14
15	225,0	228,01	231,04	234,09	237,16	240,25	243,36	246,49	249,64	252,81	15
16	256,0	259,21	262,44	265,69	268,96	272,25	275,56	278,89	282,24	285,61	16
17	289,0	292,41	295,84	299,29	302,76	306,25	309,76	313,29	316,84	320,41	17
18	324,0	327,61	331,24	334,89	338,56	342,25	345,96	349,69	353,44	357,21	18
19	361,0	364,81	368,64	372,49	376,36	380,25	384,16	388,09	392,04	396,01	19
20	400,0	404,01	408,04	412,09	416,16	420,25	424,36	428,49	432,64	436,81	20
21	441,0	445,21	449,44	453,69	457,96	462,25	466,56	470,89	475,24	479,61	21
22	484,0	488,41	492,84	497,29	501,76	506,25	510,76	515,29	519,84	524,41	22
23	529,0	533,61	538,24	542,89	547,56	552,25	556,96	561,69	566,44	571,21	23
24	576,0	»	»	»	»	»	»	»	»	»	24

TABLE (v)

donnant en mètres, à la seconde, la valeur de la vitesse relative v de l'air dans les cyclones, en fonction de la baisse barométrique effective (H — h) exprimée en nombre et fractions de millimètres.

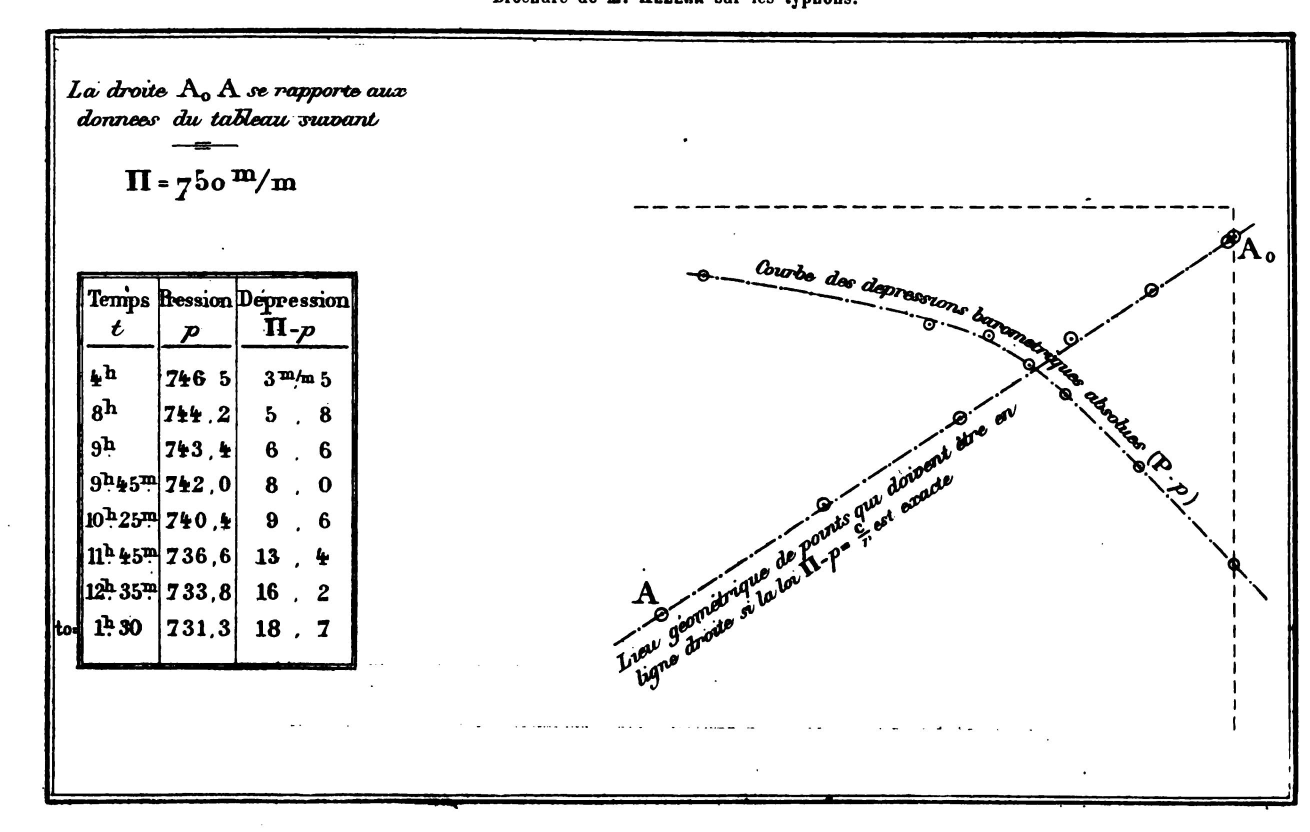
$$v=\sqrt{\tfrac{1}{2}\,9,81\,\frac{13^k,550}{1^k,2932}\,(1+0,00367)\,.\,(H-h)}.$$

H—h.	0,0.	0,1.	0,2.	0,3.	0,4.	0,5.	0,6.	0,7.	0,8.	0,9.
3	12,77	12,98	13,19	13.39	13,59	13,79	13,99	14,21	14,37	14,56
4	14,74	14,93	15,11	15,29	15,46	15,64	15,81	15,98	16,15	16,31
5	16,48	16,65	16,81	16,97	17,13	17,29	17,44	17,60	17,75	17,91
6	18,06	18,20	18,36	18,50	18,65	18,79	18,94	19,08	19,22	19,36
7	19,50	19,64	19,78	19,92	20,05	20,19	20,32	20,46	20,59	20,72
8	20,85	20,98	21,12	21,24	21,37	21,49	21,62	21,74	21,87	21,99
9	22,12	22,24	22,36	22,48	22,60	22,72	22,84	22,96	23,08	23,20
10	23.31	23,43	23,54	23,66	23,77	23,89	24,00	24,11	24,23	24,34
11	24,45	24,56	24,67	24,78	24,89	25,00	25,11	25,21	25.32	25,43
12	25,54	25,64	25,75	25,85	25,96	26,06	26,17	26,28	26,37	26,48
13	26,58	26,68	26,78	26,88	26,99	27,09	27,19	27,29	27,39	27,48
14	27,58	27,68	27,78	27,88	27,97	28,07	28,17	28,27	28,36	28,46
15	28,55	28,65	28,74	28,84	28,93	29,02	29,12	29,21	29,30	29,39
16	29,49	29,58	29,67	29,76	29,85	29,95	30,04	30,13	30,22	30,31
17	30,40	30,48	30,57	30,66	30,75	30,84	30,93	31,01	31,10	31,19
18	31,28	31,36	31,45	31,54	31,62	31,71	31,79	31,88	32,00	32,05
19	32,13	32,22	32,30	32,38	32,47	32,55	32,64	32,72	32,80	32,89
20	32,97	33,05	33,13	33,22	33,29	33,38	33,46	33,54	33,62	33,70

PLANCHE I.

TYPHON - HONG-KONG du 31 août 1848.

Brochure de M. KELLER sur les typhons.

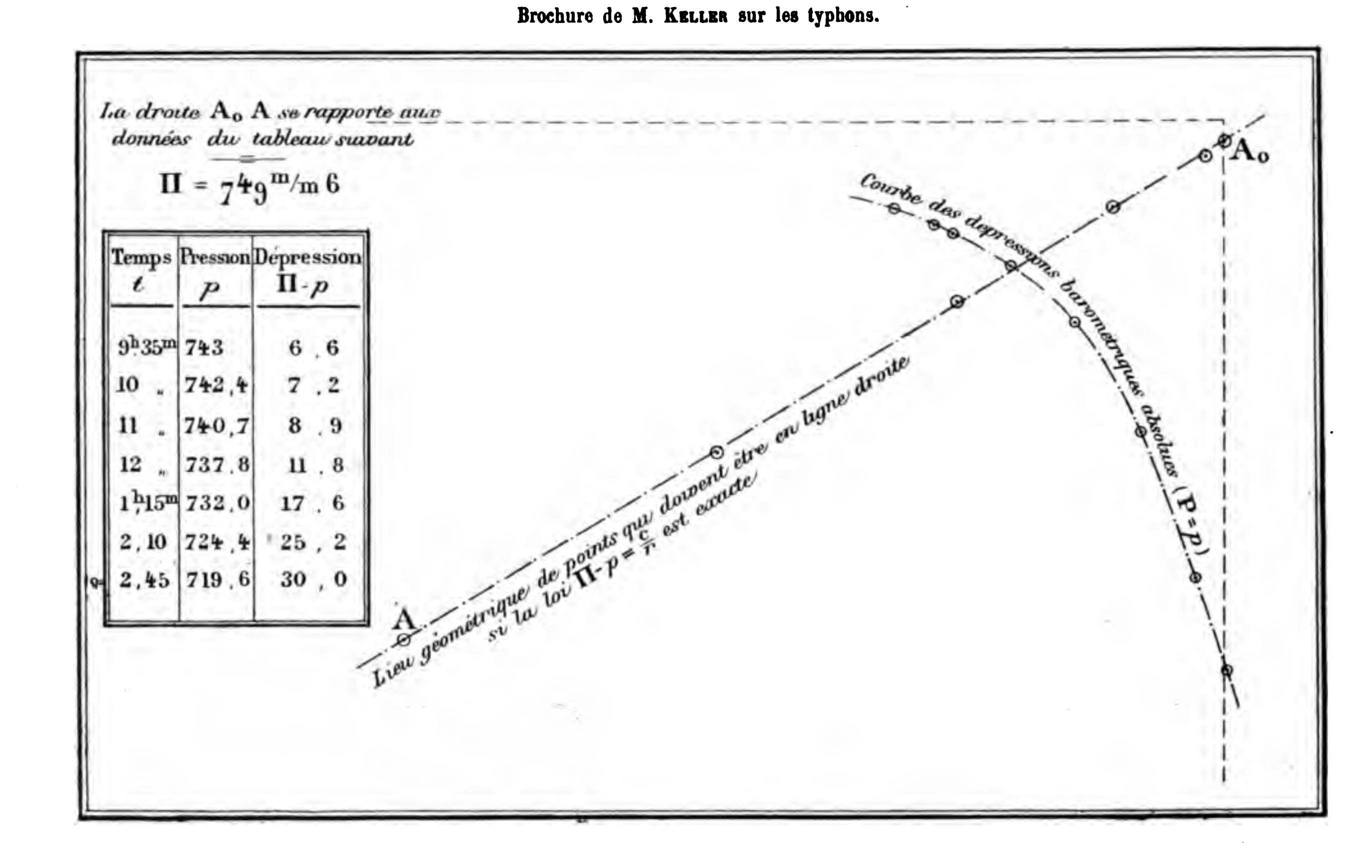


Temps t	Pression p	Dépression $\Pi - p$
4h	746 5	3 m/m 5
8h	744 ,2	5 , 8
9h	743 ,4	6 , 6
9h 45m	742 ,0	8 , 0
10h 25m	740 ,4	9 , 6
11h 45m	736 ,6	13 , 4
12h 35m	733 ,8	16 , 2
1h 30	731 ,3	18 , 7

PLANCHE II.

TYPHON - MACAO du 31 août 1848.

Brochure de M. KELLER sur les typhons.

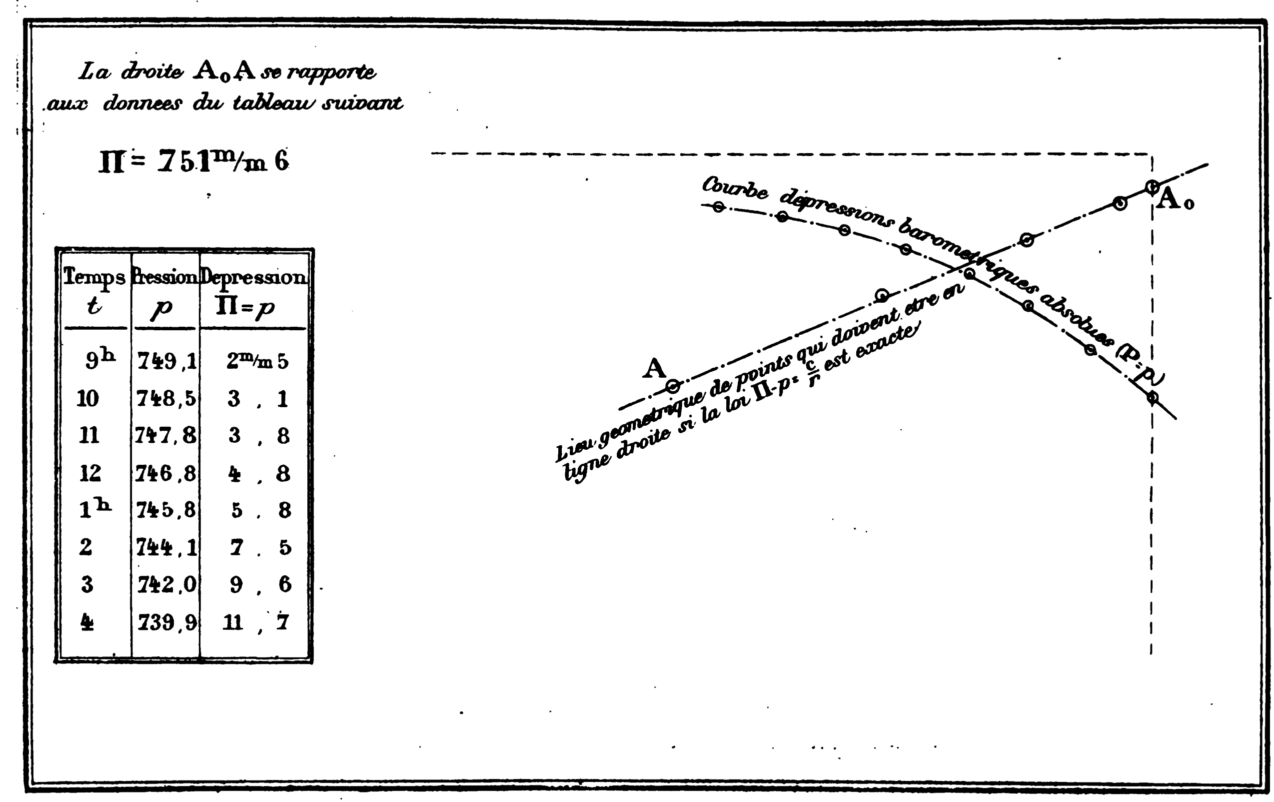


Temps t	Pression p	Dépression $\Pi - p$
$9^{h}35^{m}$	743	6,6
10 "	742,4	7,2
11 "	740,7	8,9
12 "	737,8	11,8
$1^{h}15^{m}$	732,0	17,6
2,10	724,4	25,2
2,45	719,6	30,0

PLANCHE III.

TYPHON-SHANGHAI des 15 et 16 juillet 1881.

Publication annuelle de l'observatoire de Zi-Ka-Weï (A. S.).

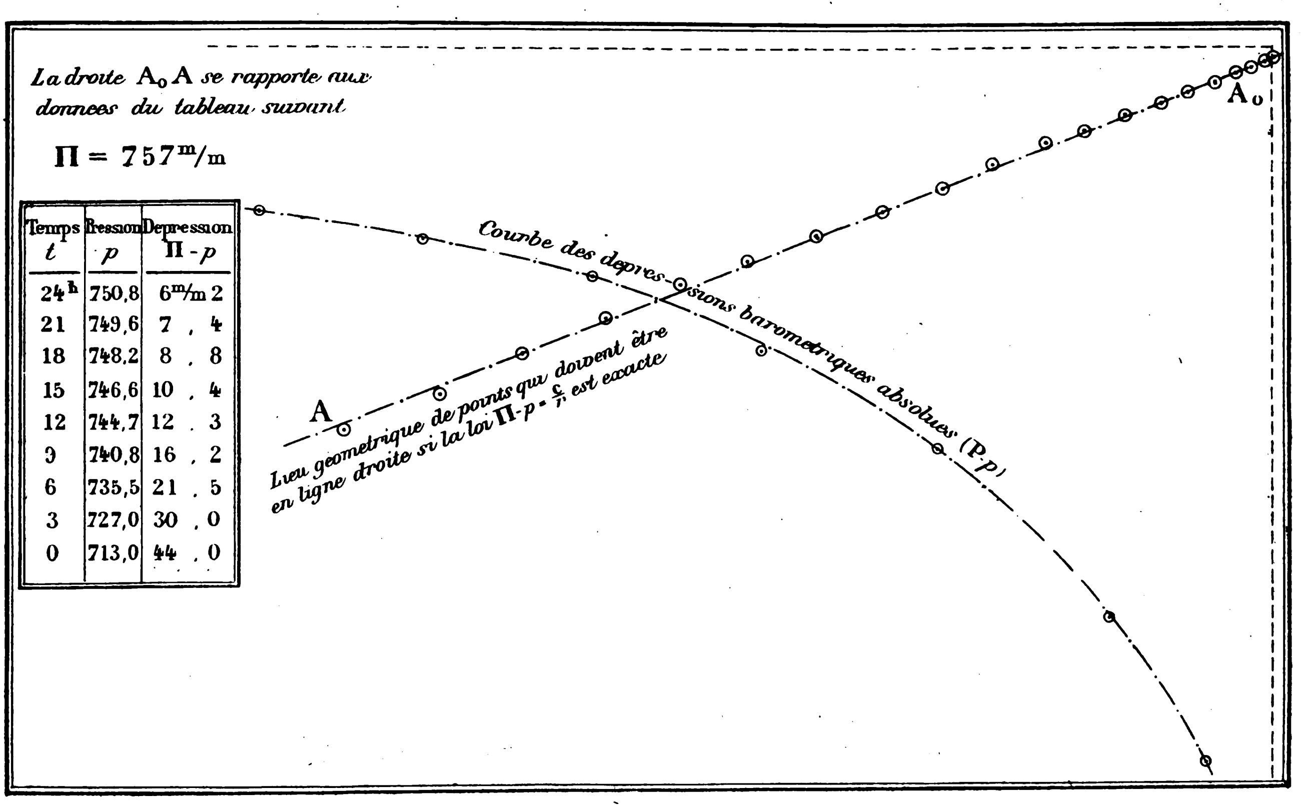


Temps t	Pression p	Dépression $\Pi = p$
9h	749,1	2m/m 5
10	748,5	3 , 1
11	747,8	3 , 8
12	746,8	4 , 8
1h	745,8	5 , 8
2	744,1	7 , 5
3	742,0	9 , 6
4	739,9	11 , 7

PLANCHE IV.

CYCLONE-RÉUNION de février 1860.

Ouvrage de M. BRIDET sur les ouragans de l'hémisphère sud.

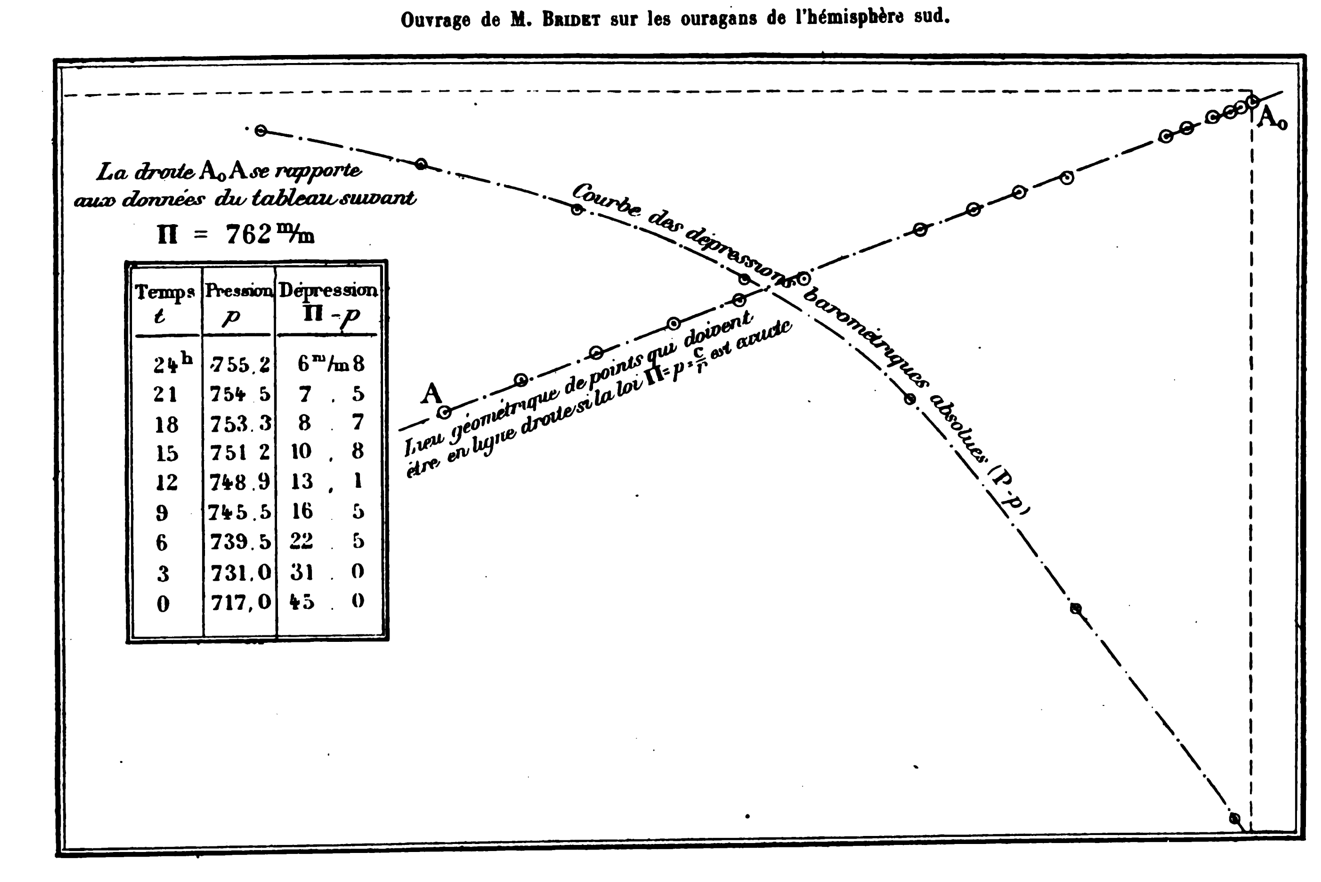


Temps t	Pression p	Dépression $\Pi - p$
24h	750,8	6m/m 2
21	749,6	7 , 4
18	748,2	8 , 8
15	746,6	10 , 4
12	744,7	12 , 3
9	740,8	16 , 2
6	735,5	21 , 5
3	727,0	30 , 0
0	713,0	44 , 0

PLANCHE V.

CYCLONE - RÉUNION de mars 1888.

Ouvrage de M. BRIDET sur les ouragans de l'hémisphère sud.

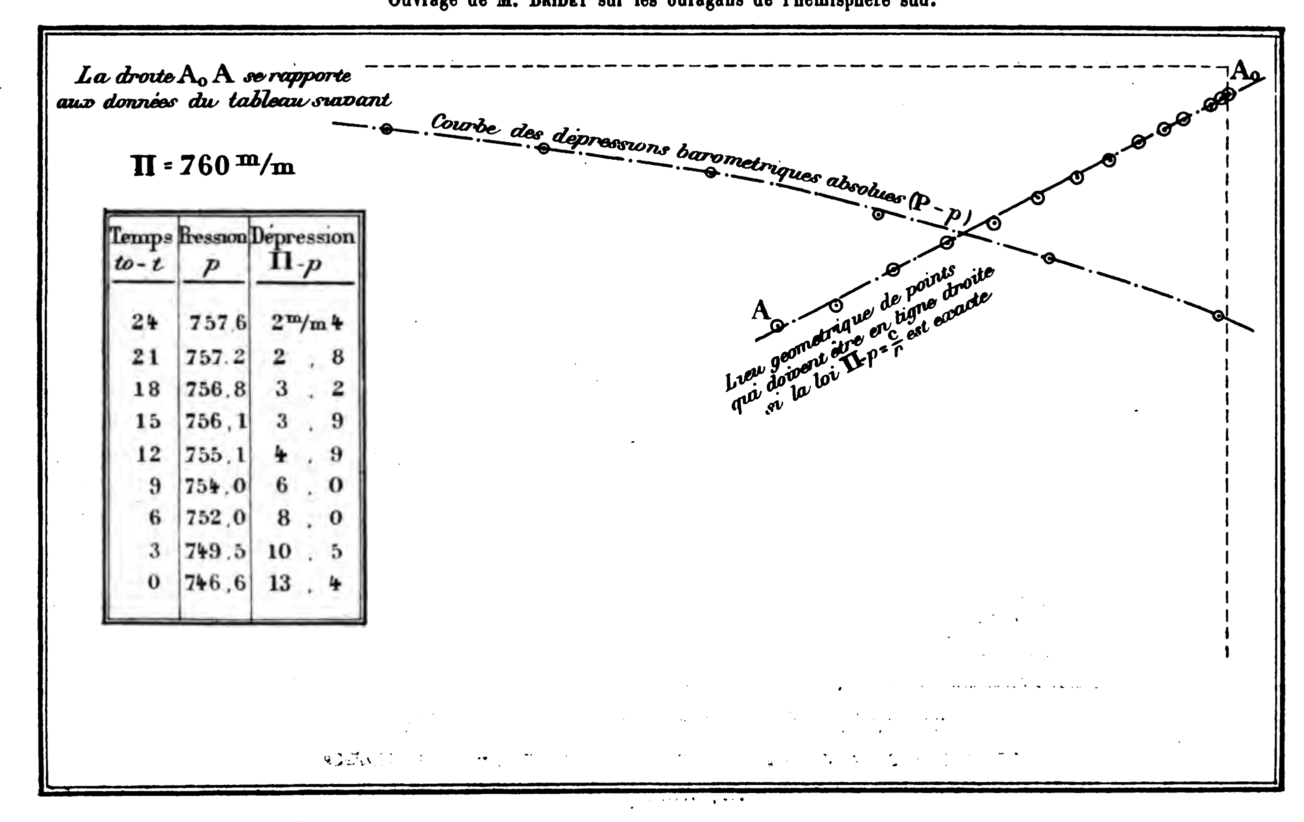


Temps t	Pression p	Dépression $\Pi - p$
24h	755.2	6m/m 8
21	754.5	7.5
18	753.3	8.7
15	751.2	10.8
12	748.9	13.1
9	745.5	16.5
6	739.5	22.5
3	731.0	31.0
0	717.0	45.0

PLANCHE VI.

CYCLONE - RÉUNION de mars 1889.

Ouvrage de M. Bridet sur les ouragans de l'hémisphère sud.

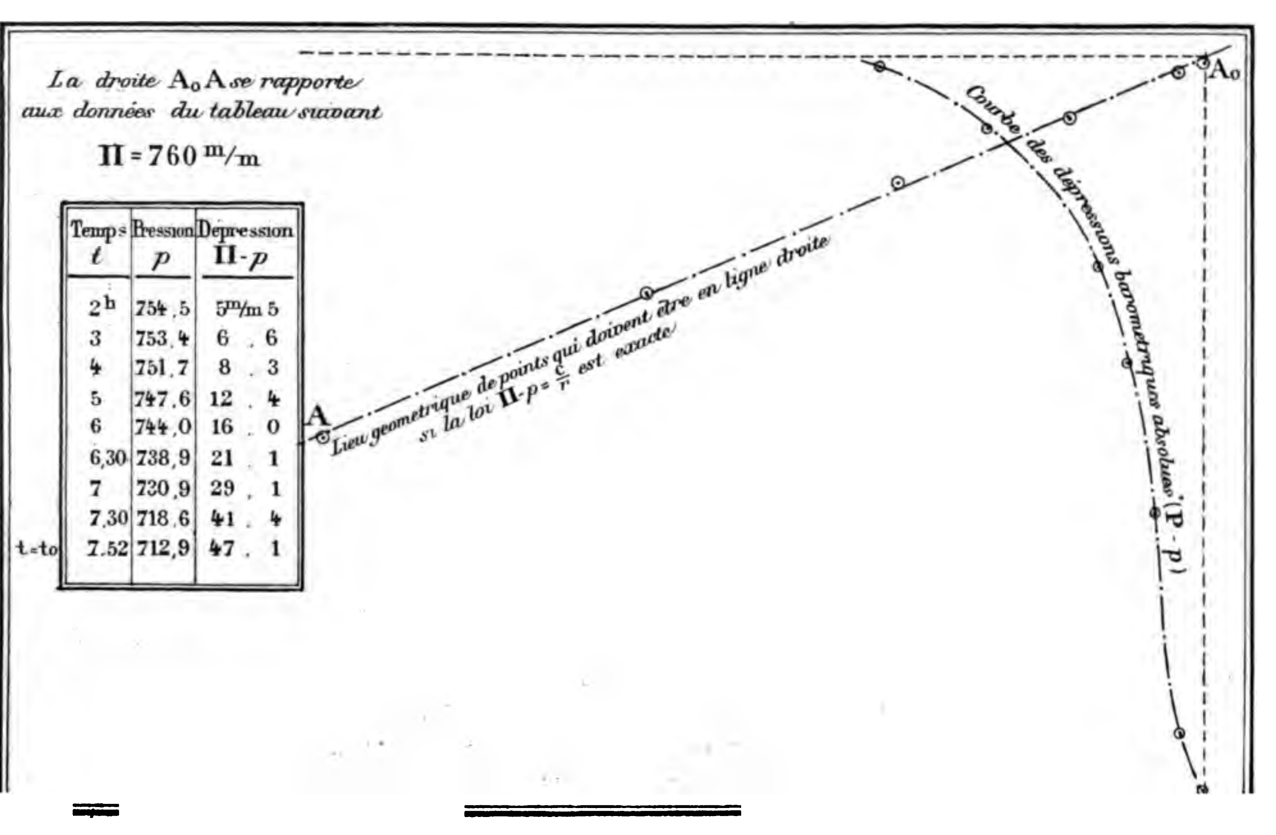


Temps $t_0 - t$	Pression p	Dépression $\Pi - p$
24	757,6	2 m/m 4
21	757,2	2 , 8
18	756,8	3 , 2
15	756,1	3 , 9
12	755,1	4 , 9
9	754,0	6 , 0
6	752,0	8 , 0
3	749,5	10 , 5
0	746,6	13 , 4

PLANCHE VII.

CYCLONE-SAINT-THOMAS du 2 août 1887.

Ouvrage de M. BRIDET sur les ouragans de l'hemisphère sud.



	Temps t	Pression p	Dépression $\Pi - p$
	2h	754,5	5m/m 5
	3	753,4	6 . 6
	4	751,7	8 . 3
	5	747,6	12 . 4
	6	744,0	16 . 0
	6,30	738,9	21 . 1
	7	730,9	29 . 1
	7,30	718,6	41 . 4
t=to	7.52	712,9	47 . 1

Les cyclones sont des tourbillons circulaires formés autour d'un noyau central d'accalmie et qui sont enveloppés d'une atmosphère de vents convergents troublés par la circulation extérieure.

10. On vient de vérifier expérimentalement et numériquement la loi très approchée

$$\Pi - p = \frac{C}{R}, \tag{II}$$

et l'on voit qu'elle est applicable, en effet, indistinctement à des cyclones les plus différents et de diverses régions, c'est-à-dire que l'erreur dont elle s'y trouve affectée ne dépasse pas le degré de précision qu'y comporte l'approximation des observations barométriques.

On peut donc considérer cette loi comme exacte pour ses applications. Cela posé, substituons, dans la relation générale (3),

$$\frac{dp}{dR} = \frac{2\mu_p v^2}{R} \cdot \left(1 - \frac{\Pi - p}{p}\right), \tag{3}$$

dont elle provient, l'expression (I)

$$2\mu_p v^2 = \Pi - p, \tag{I}$$

on aura la relation exacte

$$\frac{dp}{dR} = \frac{(\Pi - p)}{R} \cdot \left(1 - \frac{\Pi - p}{p}\right).$$

Mais, $\frac{dp}{dR}$ est l'expression de la poussée exercée sur l'*unité de volume* d'air, de masse $\mu_p = Kp$, par l'aspiration centrale résultant de la pente, $\frac{dp}{dR}$, par unité de longueur, des pressions qui décroissent vers le centre de raréfaction sur le niveau terrestre,

L'expression f de cette attraction centrale, *par unité de masse*, est donc

$$f = \frac{(\Pi - p)}{R \cdot Kp} \cdot \left(1 - \frac{\Pi - p}{p}\right),$$

ou

$$f = \frac{\Pi - p}{R . K\Pi} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\Pi - p}{p}\right)}{\left(1 - \frac{\Pi - p}{\Pi}\right)},$$

ou enfin

$$f = \frac{\Pi - p}{R . K\Pi} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi - p}{p}\right)^2\right].$$

Or, entre les limites où la pente $\frac{dp}{dR}$ des pressions décroissantes est progressive et peut donc être représentée par cette formule (3), la baisse barométrique varie de 30^{mm}, au plus, et la pression, de de 760^{mm} à 720^{mm}. Le rapport

$$\frac{\Pi - p}{p}$$

est donc moindre que

$$\frac{30}{720} = 0,04,$$

et par suite,

$$\left(\frac{\Pi - p}{p}\right)^2 < 0,002.$$

Si même on prenait les valeurs centrales maxima et minima de $\Pi - p$ et de p, qui ne dépassent pas

$$50^{mm} \quad \text{et} \quad 700^{mm},$$

on aurait

$$\left(\frac{\Pi - p}{p}\right)^2 < 0,005.$$

Ce rapport $\left(\frac{\Pi - p}{p}\right)^2$ est donc manifestement négligeable et l'expression de f se réduit à

$$f = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{\Pi - p}{K\Pi}\right).$$

Les substituant alors à $\Pi - p$ son expression, maintenant démontrée,

$$\Pi - p = \frac{C}{R},$$

on a enfin

$$f = \frac{1}{R^2} \cdot \left(\frac{C}{K\Pi}\right).$$

Cette relation indique, qu'entre les rayons extérieurs et intérieurs R_1 et R, de la région annulaire où l'entraînement giratoire s'opère directement, par transmission verticale, du tourbillon générateur jusqu'au niveau terrestre, et sur laquelle, seulement, cette expression de f est applicable, chaque *unité de masse* d'air est sollicitée par une aspiration centrale

$$f=\frac{1}{R^2}\cdot\left(\frac{C}{K\Pi}\right),$$

inversement proportionnelle au carré de la distance R_1 à l'origine de cette attraction, qui est le centre des dépressions et de la raréfaction atmosphérique sur la base du cyclone.

On en déduit que, dans le corps même du tourbillon, c'est-à-dire entre les rayons R_1 et de R_0 de sa base, où la loi

$$\Pi-p=\frac{C}{R}.$$

est applicable, l'écoulement progressif de l'air le long des rayons des isobares cesse de se produire et que les molécules aériennes y gravitent donc autour du centre commun de ces isobares, en cédant uniquement à l'entraînement giratoire qui leur vient directement, par cheminement vertical et descendant, du tourbillon générateur de l'ouragan.

Mais, en dehors de l'isobare de rayon R_1, qui constitue l'enveloppe extérieure du tourbillon, les forces vives giratoires étant transmises seulement, horizontalement, par les oscillations rayonnantes qui entremêlent les molécules aériennes, d'une couche à l'autre, concentriquement à cette enveloppe, se perdent beaucoup plus vite, par dispersion.

L'air est donc d'autant plus convergent et soumis à la circulation extérieure qu'il est plus éloigné du tourbillon, jusqu'à l'isobare des pressions culminantes Π.

On s'explique ainsi, par la diminution graduelle du rayon de l'enveloppe extérieure du tourbillon circulaire, d'un niveau atmosphérique à l'autre jusqu'au sol, qu'au début d'un cyclone, on observe, sur le niveau terrestre, des vents qui convergent vers le centre des dépressions de l'ouragan, tandis qu'au-dessus, sur les niveaux où l'entraînement giratoire s'opère encore directement, par

transmission verticale, on voit les nuages chasser perpendiculairement aux rayons du météore, c'est-à-dire concentriquement à l'axe vertical du tourbillon générateur.

Enfin, l'air étant de plus en plus entraîné par le mouvement giratoire de l'enveloppe du tourbillon à mesure qu'il s'en rapproche, en même temps qu'il est aspiré par le vide tendant à se creuser en arrière de cette enveloppe par l'effet de sa translation, on s'explique pourquoi les rayons de la partie antérieure des cyclones sont plus grands que ceux de leur partie postérieure.

D'autre part, en dedans de l'isobare intérieur du tourbillon circulaire et près de son axe de révolution, c'est-à-dire dans la région qui est la projection verticale de l'entonnoir central par où les masses glacées et sèches des hautes couches atmosphériques se déversent presque verticalement dans la région nuageuse dont elles s'ouvrent l'accès en y condensant, plus qu'il ne leur est nécessaire à cet effet, les vapeurs chaudes et surchargées d'électricité que l'évaporation terrestre y renouvelle sans cesse, l'entraînement giratoire direct devient très faible. Or, il s'affaiblit en outre très rapidement par voie de transmission horizontale dans le conflit des vents d'aspiration qui se heurtent à l'axe central du météore, en y affluant en toutes directions opposées; le calme entrecoupé de brises folles se rétablit donc nécessairement dans cette région circonscrite par le tourbillon circulaire.

On voit, en définitive, que le mécanisme oscillatoire entretenu par les réactions sur le globe des trépidations verticales si violentes dues aux phénomènes tumultueux qui président à la formation et à l'entretien des cyclones, est l'agent de conservation de leur tourbillon circulatoire, de l'entraînement giratoire de l'air, de la baisse barométrique, et la cause des lois

$$\text{(I)} \qquad 2\mu p\, v^2 = \Pi - p,$$

$$\text{(II)} \qquad \Pi - p = \frac{C}{R},$$

$$\text{(III)} \qquad \theta = 90^\circ\,*,$$

qui régissent la circulation relative de l'air sur la base de ces tem-

* θ est l'inclination de la circulation relative de l'air sur le rayon correspondant de la base du tourbillon.

pêtes, entre les rayons extérieurs et intérieurs R_1 et R_0 du tourbillon circulaire, où l'entraînement giratoire de l'air s'opère verticalement et directement, depuis le tourbillon générateur jusqu'au niveau terrestre.

TROISIÈME PARTIE.

CHOIX DE LA ROUTE DE SÉCURITÉ D'UN NAVIRE DANS UN CYCLONE.

---

11. Le capitaine d'un navire assailli par un cyclone doit chercher aussitôt à diriger ce bâtiment, le plus tôt possible, et avec toute la vitesse qu'il pourra soutenir, d'après l'état de la mer et du vent, sans risquer d'avaries graves, dans la route passant à distance maximum du cœur de l'ouragan.

Cette question si intéressante, pour les navigateurs, du choix de la route offrant à un navire le maximum de sécurité compatible avec ses qualités nautiques et le degré de violence de la tempête, est dominée par des considérations étrangères à la météorologie, mais qui s'imposent aux marins et qu'il importe donc de rappeler avant tout.

Un navire à vapeur, ou voilier, ne peut soutenir dans un cyclone, sans risquer des avaries majeures : ni une allure trop rapprochée de celle du *vent du travers*, parce qu'il serait couché par la violence des rafales et capelé par les énormes vagues déferlantes de ces ouragans ; ni une allure trop écartée de celle du *vent arrière*, à cause des irrésistibles embardées au vent, et, par suite, des coups de mer du travers auxquels il serait exposé en recevant, obliquement, par la hanche, dans une course rapide, les poussées impétueuses du vent et des lames.

Or, le capitaine d'un bâtiment, que nous supposerons à vapeur, pour fixer l'esprit, n'ayant de choix qu'entre ces deux alternatives : fuir *vent arrière*, ou *remonter dans le vent* dans une direction rectiligne en prenant la lame obliquement, à *quatre quarts* environ d'incidence au début, doit se décider pour celle de ces deux seules

allures possibles qui écartera le bâtiment, plus que l'autre, du centre des dépressions.

Les règles données à cet égard pour les bâtiments à voiles, et consacrées déjà par une longue expérience, étaient basées sur la loi de concentricité de la circulation relative de l'air dans les tourbillons atmosphériques à dépression centrale, dont on vient de donner une confirmation théorique, et sur l'évolution apparente des vents, qui en est la conséquence, pour un observateur stationnant sur le passage de la partie antérieure de ces tourbillons.

Cette évolution présente les particularités suivantes :

Représentons par α_0 le point qui est l'origine du déplacement relatif, par rapport au centre O des dépressions, quand ce déplacement est tel que la direction du vent apparent reste invariable.

Selon que l'origine du déplacement relatif est située à *droite* ou à *gauche* de α_0, l'observateur y voit le point de l'horizon, d'où il reçoit le vent, s'y déplacer :

Dans le sens *direct*[1], ou dans le sens *rétrograde*, dans quelque hémisphère que ce soit.

Règles actuelles.

12. Cela posé, on peut résumer ainsi les règles actuelles conçues autrefois pour les bâtiments à voiles, en les rendant applicables aux bâtiments à vapeur :

1° Prendre l'allure de fuite *vent arrière*, en conservant ensuite le cap initial de cette allure, quand l'évolution angulaire du vent reste sensiblement nulle, sur un navire stationnant à la cape, ou bien, lorsqu'elle s'y produit dans le sens *rétrograde* dans l'hémisphère nord, et *direct* dans l'hémisphère sud;

2° Remonter au contraire, au plus près, dans le vent, en prenant la lame obliquement, à quatre quarts environ d'incidence au début, avec toute la vitesse que le bâtiment pourra soutenir, à la vapeur, à ce même cap, sans risquer d'avaries graves, quand on voit l'évolution du vent s'effectuer dans le sens *direct*, dans l'hémisphère nord et, dans le sens *rétrograde*, dans l'hémisphère sud.

Dans ces conditions, il est évident que l'évolution angulaire du

[1] Celui de la marche des aiguilles d'une montre sur son cadran.

vent doit être insensible quand l'origine du déplacement relatif du navire est le point (α) du même isobare, d'où, en prenant l'une ou l'autre de ses deux seules allures de sécurité possibles, le bâtiment passerait, en temps égaux, à distances égales du centre des dépressions, avec les vitesses très différentes qu'il pourrait y soutenir.

D'après cette définition même du point (α) et les considérations précédentes, on peut présenter maintenant les règles actuelles sous une forme nouvelle.

Forme nouvelle des règles de navigation dans les cyclones.

13. Considérons l'isobare, de rayon *o* A, d'un navire, à l'origine de son déplacement relatif par rapport au centre des dépressions pendant sa période de stationnement et d'observation, de durée (*t'*—*t*), sur la base du météore, dans l'hémisphère nord (*fig.* 2), ou dans l'hémisphère sud (*fig.* 3) :

1° Si l'origine de ce déplacement relatif est, sur le même isobare, à *droite* du rayon *o* (α), c'est la route du *plus près*, à quatre quarts de la lame au début, que ce bâtiment doit prendre, tribord au vent, dans l'hémisphère nord, et la route *vent arrière* dans l'hémisphère sud ;

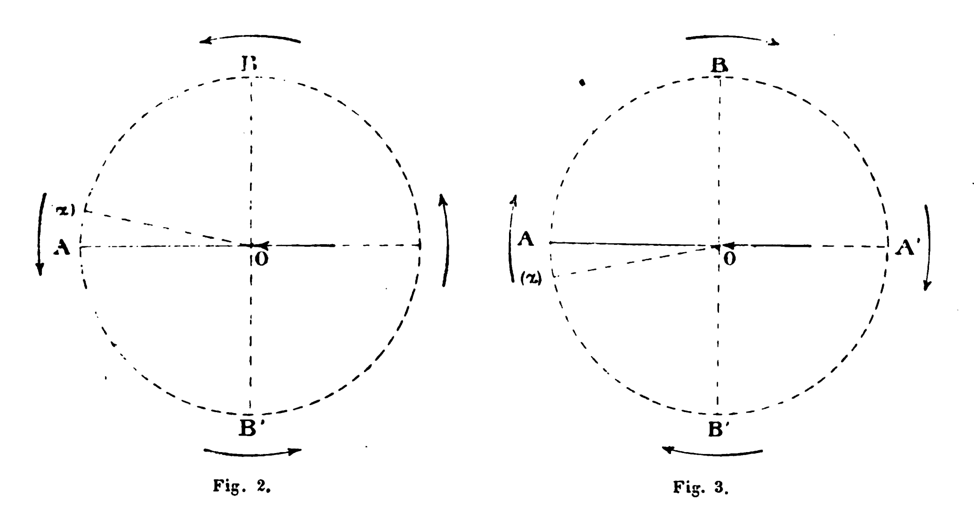


Fig. 2. Fig. 3.

2° Si, au contraire, cet origine est à *gauche* du rayon *o* (α), c'est la route du *plus près*, à quatre quarts de la lame, que ce bâtiment

doit suivre, bâbord au vent, dans l'hémisphère sud, et la route *vent arrière* dans l'hémisphère nord ;

3° Si, enfin, l'origine du déplacement relatif du navire stationnaire est au point (α) même, le bâtiment parviendrait, en temps égaux, à la même distance du centre des dépressions, en prenant l'une ou l'autre de ces deux seules allures de sécurité possibles, qui réaliseraient alors les conditions de sécurité *moyennes*. Toutefois, si le capitaine n'avait pas de raisons particulières pour prendre la route du plus près, il devrait préférer celle de vent arrière, puisqu'elle le conduirait du côté *maniable* de la tempête, où la violence des vents de giration est atténuée par la vitesse de translation du tourbillon.

Élément indicateur de la route de sécurité d'un navire dans un cyclone.

14. Jusqu'ici, on a pris, pour élément indicateur de la route de sécurité d'un navire dans un cyclone, le sens de l'évolution angulaire du vent pendant le déplacement relatif d'épreuve du navire stationnaire, qui est nécessaire à la mesure de son amplitude. Malheureusement, cet élément fait défaut tant que l'évolution relative du gisement du centre des dépressions n'atteint pas une amplitude suffisante pour le rendre nettement apparent. La situation de l'observateur devient alors très embarrassante, car il ignore si cette invariabilité de la direction moyenne du vent sera de courte durée ou si elle doit se prolonger longtemps encore. Or, en tardant outre mesure à faire prendre à son bâtiment l'allure de sécurité nécessaire, il perd un temps précieux qu'il aurait pu mettre à profit pour faire bonne route et améliorer ainsi sa situation relative dans la tempête pendant que le temps est encore maniable. De plus, ce retard peut compromettre même la sécurité du bâtiment, en l'obligeant finalement à présenter le travers au vent soufflant en ouragan au cœur du tourbillon, et aux énormes vagues qu'il y soulève, s'il lui faut alors passer, de la cape au vent arrière, par une manœuvre des plus périlleuses.

Cette incertitude sur l'origine du déplacement relatif du navire dans le cyclone, par rapport au point α_0 du même isobare, d'où ce déplacement rendrait invariable la direction du vent, s'étend sur un

arc MM′ assez considérable de cet isobare, de part et d'autre du point α_0, et comprenant le point (x), à cause de la petitesse de l'évolution horaire correspondante MO*m* du rayon de l'observateur (*fig.* 4). Or, cette évolution horaire du rayon, dont le sens commande celui de l'évolution du vent, est d'autant plus petite que l'observateur est plus rapproché, à son origine M, de la trajectoire centrale OA du tourbillon, et plus éloigné du centre O des dépressions.

Enfin, la mesure même de cette évolution indicatrice est très difficile à obtenir avec quelque précision, car elle dépend de la direction moyenne du vent, sans cesse troublé par les rafales et qu'on ne peut apprécier avec certitude sur la rose oscillante d'un compas de relèvement, affolée à tout instant par le roulis et les coups de mer, tant qu'elle ne dépasse pas sensiblement l'amplitude des erreurs d'observation.

En fin de compte, la variation angulaire de la direction moyenne du vent observé est une indication incertaine, trop peu sensible dans le voisinage de la trajectoire du centre des dépressions et faisant ainsi défaut, surtout quand le navire est devant ce centre, c'est-à-dire dans la position relative dont il aurait précisément intérêt à s'écarter le plus rapidement possible.

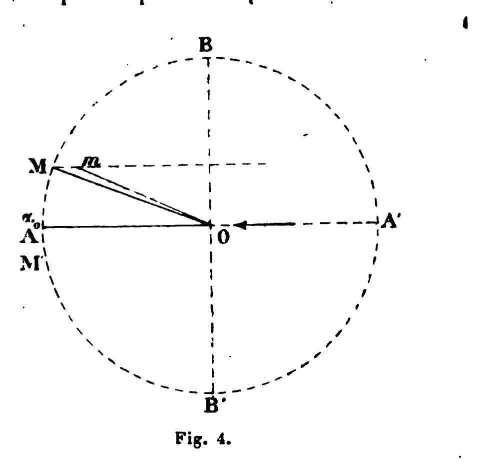


Fig. 4.

Il importe donc de substituer, au sens de la variation angulaire du vent, un élément indicateur de la route de sécurité du navire mieux approprié à son but et n'obligeant pas l'observateur à prolonger la période de stationnement et d'observation d'épreuve

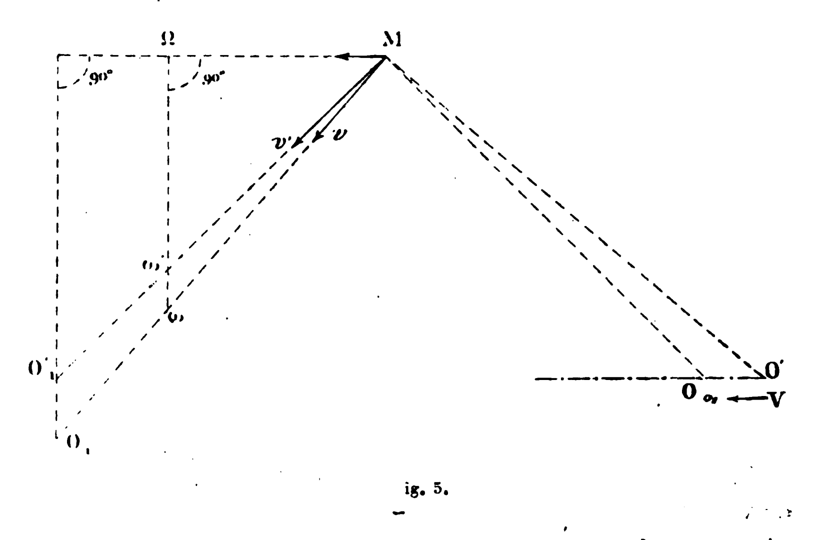
au delà de une heure environ, délai minimum nécessaire à la mesure, avec une approximation suffisante, de la baisse barométrique horaire correspondante ($h - h'$).

Ce nouvel élément indicateur de la route de sécurité d'un navire dans les cyclones et la manière de l'utiliser pour la détermination de cette route dans le cas où la direction du vent observé restant fixe, en apparence, pendant le déplacement relatif horaire, réduirait les règles actuelles à l'impuissance, ressortent des relations géométriques caractérisant en particulier la position du navire à l'origine de ce déplacement relatif, quand elle coïncide avec (α), et de celles qui s'appliquent indistinctement à toute autre position sur le même isobare.

Ce sont ces relations que nous nous proposons maintenant de mettre en lumière.

Relation géométrique commune à toutes les positions du navire sur son isobare, à l'origine de son déplacement relatif d'épreuve à son entrée dans le cyclone.

15. Soit : $MV = 10^{mm}.V$ (*fig.* 5) la longueur mesurant la vitesse V du déplacement OO′ du centre O des dépressions par rapport au



ig. 5.

navire immobilisé, au point M ; OO′ les positions du centre des dépressions aux époques successives t et t', les distances MO et MO′

étant liées entre elles et aux baisses barométriques correspondantes $H - h$ et $H - h'$ par la relation

$$\frac{MO}{MO'} = \frac{H - h'}{H - h}$$

conformément à la loi dynamique (II).

Si l'on fait effectuer au triangle MOO', tournant d'une seule pièce autour de son sommet M, une révolution de 90° de façon à amener ses côtés à coïncider, dans les positions MO_1, MO_1', avec les directions $Mv = 10^{mm}.v$ et $Mv' = 10^{mm}\,v'$ des vitesses giratoires v et v' qui leur sont nécessairement perpendiculaires, on voit que le prolongement de $O_1O'_1$ coupera celui de MV sous l'angle de 90°.

Si donc, on porte : sur Mv, une longueur quelconque, $M\omega$, proportionnelle à la baisse barométrique $(H - h')$, soit

$$M\omega = \lambda . (H - h');$$

et sur Mv', une longueur $M\omega'$ proportionnelle à $(H - h)$, à la même échelle, soit

$$M\omega' = \lambda . (H - h),$$

et que l'on joigne $\omega\omega'$, cette droite prolongée coupera le prolongement de MV au point Ω, sous un angle

$$\Omega = \omega \Omega M = 90^\circ.$$

On a, en effet, ainsi, par construction,

$$\frac{M\omega}{M\omega'} = \frac{H - h'}{H - h},$$

mais on a également, d'après ce qui précède,

$$\frac{MO_1}{MO'_1} = \frac{H - h'}{H - h}$$

et par suite

$$\frac{M\omega}{M\omega'} = \frac{MO_1}{MO'_1}$$

relation indiquant que $\omega\omega'$ est parallèle à $O_1O'_1$ et conséquemment perpendiculaire à MV.

On reconnaît ainsi que, dans le cas où l'on pourrait déterminer

les directions Mv et Mv' des vitesses giratoires, il suffirait d'y porter, comme on vient de l'indiquer, les baisses barométriques $H-h$ et $H-h'$, en les inversant, de façon à déterminer les points ω et ω', et de mener, du point M, une perpendiculaire $M\Omega$ à la droite $\omega\omega'$ prolongée, pour connaître la direction MV du déplacement relatif du centre des dépressions du cyclone. Cette construction sera utilisée dans la solution à laquelle cette analyse doit aboutir.

Particularité géométrique relative à la position (α) du navire, à l'origine de son déplacement relatif d'épreuve.

16. Soit M la position fixe du navire à l'époque t (*fig.* 6) :

$Mn = 10^{mm}.n$ et $MN = 10^{mm}.N$ des longueurs représentant, à

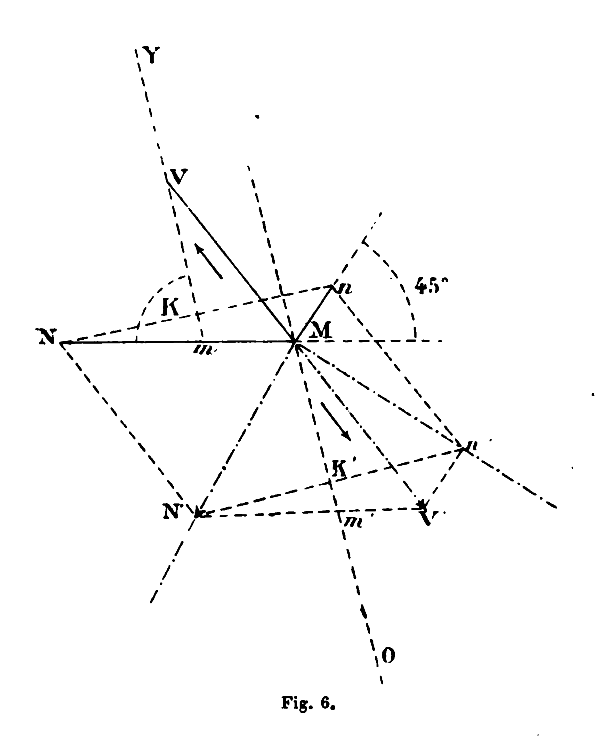


Fig. 6.

l'échelle adoptée, les vitesses propres N et n du navire, dans les deux routes de sécurité possibles, du vent arrière et du plus près, N étant, en général, trois fois plus grande que n;

$MV' = 10^{mm}.V'$ une longueur représentant, à la même échelle, la vitesse de translation V du cyclone, mais portée dans le sens contraire à sa direction MV.

Si le point M coïncide avec le point (α), d'après la définition même de ce point, le gisement MO du centre O des dépressions doit être également distant des vitesses MN' et Mn' des déplacements relatifs qu'effectuerait le navire en composant ses vitesses propres N et n avec la vitesse $MV' = - MV$, c'est-à-dire la vitesse de translation V du cyclone, prise en sens inverse. De plus, ces vitesses relatives MN' et Mn' doivent être égales. Ces deux conditions sont en effet nécessaires et suffisantes pour que le navire, en suivant dans son déplacement relatif la direction MN' avec la vitesse MN' ou la direction Mn' avec la vitesse Mn', parvienne, en temps égaux, à la même distance du centre O des dépressions.

Cela revient à dire que le gisement MO de ce centre doit être, au point (α), perpendiculaire sur le milieu K' de la droite $N'n'$.

Soit m' le point où ce gisement coupe la direction N'V'. Si l'on porte $Mm = V'm'$ sur MN et que l'on joigne Nn, on voit que Vm coupera perpendiculairement Nn en son milieu K et sera donc parallèle au gisement MO du centre des dépressions.

Or, la distance mM et l'inclinaison VmN ne dépendent que des longueurs MN et Mn des vitesses N et n du navire et de leur inclinaison relative $NMn = 135^{\circ}$.

Si l'on admet, pour fixer l'esprit, que les vitesses pouvant être soutenues sur les routes de sécurité du navire dans un cyclone, soient :

$N = 6^{m},5$, à la seconde, vent arrière (13 nœuds à l'heure),
$n = 2^{m},5$, à la seconde, au plus près en prenant la lame à 4 quarts, à l'origine (5 nœuds à l'heure).

vitesses présumées qui semblent toujours réalisables, on en déduira :

$$YmN = 77^{\circ}$$

et

$$Mm = 2^{m},2$$

longueur qu'on multipliera par l'échelle adoptée de 10^{mm} par mètre de vitesse à la seconde. Ces données permettent de tracer, par rapport à la direction MN de la route de sécurité vent arrière du

navire, l'axe mY qui est, on le voit, un lieu géométrique sur lequel doit se trouver le point V.

Cette particularité permet d'établir les relations géométriques qui caractérisent le cas où le navire serait au point (α), à l'origine de son déplacement relatif par rapport au centre O des dépressions du cyclone.

Procédé de démonstration par la construction (*a*).

17. Figure relative à l'hémisphère nord. (La même construction se ferait, pour l'hémisphère sud, mais au-dessous de l'axe MX.)

CONSTRUCTION (*a*).

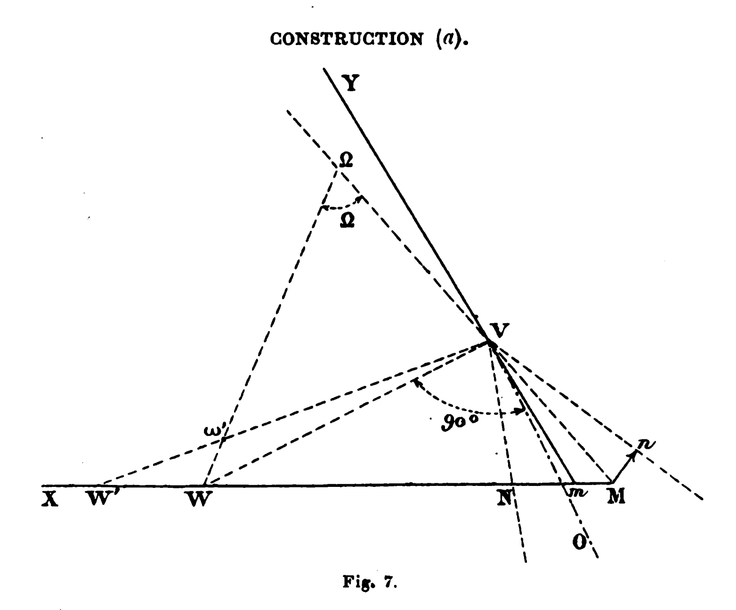


Fig. 7.

Soit : $MW = 10^{mm}.W$ et $MW' = 10^{mm}.W'$, les longueurs représentant, à l'échelle de 10^{mm} par mètre à la seconde, les vitesses W et W' du vent, que l'on suppose avoir été observées aux époques successives t et t', à une heure d'intervalle environ, sur un navire stationnant à la cape sur le passage de la partie antérieure d'un cyclone animé de la vitesse de translation V;

$WV = 10^{mm}.v$ et $VW' = 10^{mm}.v'$, les longeurs représentant, à la même échelle, les vitesses giratoires v et v' de l'air aux époques t et t';

$MN = 10^{mm}.N$ et $Mn = 10^{mm}.n$ les vitesses du navire suivant ses

routes de sécurité du vent arrière avec la vitesse $N = 6^m,5$ à la seconde et du plus près avec la vitesse $n = 2^m,5$ à la seconde.

Considérons le cas où les vitesses W et W' du vent ont la même direction MX pendant la durée $(t' - t)$, du stationnement du navire.

Des points W et W' comme centres, avec les rayons $VW = 10^{mm}.v$ et $VW' = 10^{mm}.v'$, tracer deux arcs de cercle se coupant au point V.

Joindre MV, WV et W'V.

$MV = 10^{mm}.V$ est la mesure de la vitesse V de translation du cyclone.

Porter sur VW', à partir du point V, une longeur

$$V\omega' = WV.\left(\frac{H - h}{H - h'}\right)$$

et joindre Wω'. Cette droite prolongée jusqu'à sa rencontre au point Ω avec le prolongement de MV doit couper celle-ci sous l'angle

$$\Omega = M\Omega W = 90^\circ.$$

De plus, les droites VN et Vn sont, en direction et en longueurs, à l'échelle du plan, les vitesses des déplacements relatifs qu'affecteurait le navire par rapport au centre O des dépressions du cyclone, en suivant les routes de sécurité MN et Mn, entre lesquelles il faut opter.

Enfin, selon que la perpendiculaire VO à WV est plus rapproché de N que de n, ce qui est le cas de la figure (7), ou inversement, c'est la route de sécurité Mn du plus près du vent, ou celle MN du vent arrière, que le navire doit prendre en conservant ensuite, autant que possible son cap initial.

On voit, par cette construction (a), que la solution complète qu'elle donne nécessiterait la mesure des vitesses du vent W et W', à une heure d'intervalle, au moyen d'un anémomètre. Malheureusement, la difficulté de fixer cet instrument solidement au haut d'un mât et à l'abri de toute cause obstructrice, les variations incessantes du vent dans les rafales et dans les violents roulis, l'incertitude sur la valeur comparative de ses indications instrumentales, et la petitesse de leurs variations (W' — W) en une heure, qui est de l'ordre de grandeur des erreurs d'observation, ne permetteraient pas d'en tirer

des mesures ayant une précision suffisante ni comparable à celle des hauteurs barométriques.

Nous avons donc cherché un moyen d'obtenir, au moins, la détermination de la route de sécurité du navire, sinon les autres inconnues du problème, en évitant la mesure directe, par un anémomètre, des vitesses W et W′ du vent, dans le cas particulier, le seul nécessaire, du reste, où la direction de ce vent ne changerait pas d'une façon apparente pendant le stationnement d'épreuve du bâtiment.

Pour cela, nous avons remarqué que si la baisse barométrique (H — *h*) observée à l'origine de cette période d'observation se rapportait alors à la position (α) du navire sur son isobare d'où le bâtiment peut suivre indifféremment l'une ou l'autre de ses deux routes de sécurité du plus près ou du vent arrière, la construction précédente (*a*) serait possible sans la connaissance des vitesses du vent W et W′, puisque la vitesse giratoire de l'air $WV = 10^{mm}.v$ serait, dans ce cas, ***perpendiculaire*** à l'axe *m*Y (*fig.* 7).

CONSTRUCTION (α).

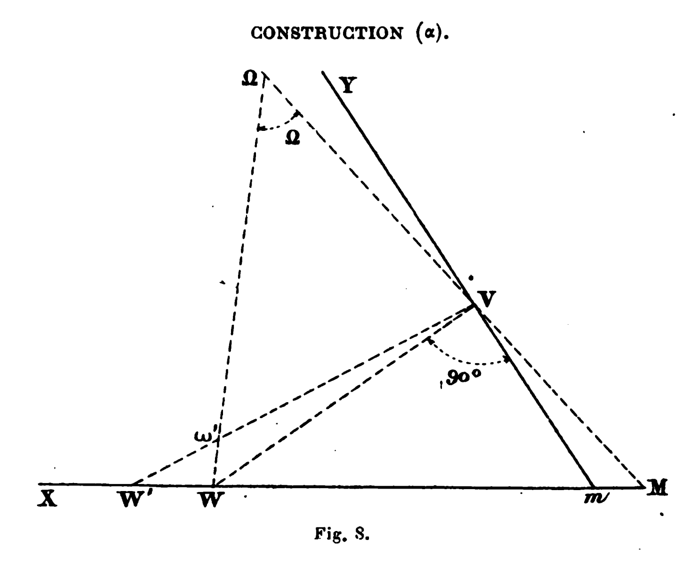


Fig. 8.

18. En faisant alors glisser une droite de longueur $WV = 10^{mm}.v$ perpendiculairement à cet axe, de façon à maintenir sur lui son extrémité V jusqu'au point où l'autre extrémité W rencontre l'axe MX, on détermine en effet, à la fois, le point V sur *m*Y et le point W sur MX.

En décrivant ensuite, du point V, comme centre, avec $VW' = 10^{mm}.v'$ pour rayon, un arc de cercle coupant l'axe MX au point W', on détermine alors MW'.

On peut donc, dans ce cas, obtenir ainsi l'angle Ω, comme on l'a fait dans la construction (*a*) et sa valeur doit être égale à 90°, si le navire occupait effectivement sur son isobare la position (α), à l'époque *t*, ainsi qu'on l'a supposé dans cette construction d'épreuve.

Si cette valeur de Ω diffère de 90°, on en conclura que les observations $(H - h)$ et $(H - h')$ employées dans cette construction (α) ont été recueillies en un autre point de l'isobare du navire, mais, où, dans tous les cas, Ω devrait être égal à 90°. Or, nous allons montrer que, selon que la valeur de cet angle, ainsi trouvée, est plus petite ou plus grande que 90° :

1°, la position (*a*) du navire sur son isobare était, à l'époque *t*, du côté de (α) où le rayon O (α) de cet isobare reçoit le choc de l'entraînement giratoire, ou du côté opposé de ce rayon ;

2°, dans le premier cas, le navire doit donc suivre la route de sécurité du plus près, tandis que, dans le second cas, c'est la route de fuite vent arrière, qu'il doit choisir.

Le sens positif ou négatif de la différence $(\Omega - 90°)$ donnée par la construction d'épreuve (α) serait donc un élément indicateur de la route de sécurité d'un navire dans un cyclone, que l'on pourrait substituer au sens, direct ou rétrograde, de l'évolution angulaire du vent, quand cette évolution ferait défaut. On remarquera, en outre, que ce nouvel élément indicateur serait très préférable à celui-ci, puisqu'il varierait beaucoup plus avec les mêmes variations relatives du girement du centre des dépressions par rapport à l'observateur.

19. Supposons d'abord que l'on ait trouvé par la construction (α)

$$\Omega > 90°,$$

Il est visible que, pour diminuer Ω, de cette valeur trop grande à 90°, il faudrait porter le point V en dehors de l'axe *m*Y, de façon à augmenter, en conséquence, l'angle WVW', ce qui diminuerait

l'angle dépendant WVM, dont les variations correspondantes sont de sens opposé.

Si, au contraire, on suppose la valeur de Ω, donnée par la construction (α), moindre que 90°,

$$\Omega < 90°,$$

il faudrait déplacer le point V de façon à diminuer l'angle WVM, et par suite à augmenter l'angle WVM. afin d'augmenter, par ces deux moyens concurrents, l'angle Ω, de cette valeur trop petite à 90°.

Or, en augmentant l'angle WVW', et par suite VWM, on rapproche la perpendiculaire VO à WV du point *n*, en l'écartant du point N, tandis qu'en diminuant l'angle WV'W. et par suite l'angle VWM, on rapproche la perpendiculaire VO du point N, en l'écartant du point *n*.

Dans le premier cas, c'est donc la route de sécurité vent arrière qui devient préférable à celle du plus près; dans le second cas, c'est au contraire la route de sécurité du plus près qui devient préférable à celle du vent arrière.

Ainsi, selon que la construction d'épreuve (α) donne un angle Ω plus grand ou plus petit que 90°, c'est la route de sécurité vent arrière, ou celle du plus près que le bâtiment doit prendre, de préférence à l'autre.

Telle est la règle nouvelle que nous proposons d'employer dans le cas où la règle actuelle n'est plus applicable, par le fait de l'invariabilité apparente de la direction du vent pendant la période d'observation où le bâtiment stationne à la cape et qu'il serait nuisible de prolonger au delà d'une heure environ.

Remarques et précautions relatives aux observations servant à la construction (α).

20. Dans les régions fréquentées par les cyclones, l'attention du capitaine d'un bâtiment doit toujours être en éveil et se porter sur les pronostics habituels de ces tempêtes : l'aspect du ciel, la nature des nuages, leur direction, leur descente vers le sol avec celle des vents qui les entraînent rapidement, la grosseur exceptionnelle et le sens inexplicable de la houle, les éclairs lointains et précipités dans la région menaçante, la sensation d'oppression que l'on éprouve, etc.

Dès que ces pronostics lui donnent lieu de redouter l'approche d'un cyclone, le capitaine du bâtiment fera entreprendre une série d'observations de hauteurs barométriques et du vent, dans les conditions qu'on va définir.

On note avec soin, après chaque quart d'heure, la hauteur barométrique, en l'appréciant à $\frac{1}{10}$ de millimètre près, ce qui est possible si l'on possède un baromètre anéroïde, non enregistreur, d'un cadran assez grand pour que l'arc d'une de ses divisions, représentant un millimètre de la colonne barométrique, embrasse une longueur de 4 à 5 millimètres. On trouve couramment, dans le commerce des instruments de ce modèle.

Au moyen de ces hauteurs barométriques, on trace une courbe des baisses $(H - h)$ en fonction du temps pour les débarrasser de leurs oscillations. L'observateur inscrit, en outre, en regard de chacune de ces hauteurs barométriques, la direction astronomique du vent relevée au compas et sa vitesse estimée.

Quand les vents qui chassent les nuages ont atteint le niveau terrestre et soufflent avec une vitesse d'au moins 25 milles à l'heure (12 mètres à la seconde), la baisse barométrique effectuée $(H - h)$ est peu différente de 3^{mm} ; on la mesure alors en recherchant parmi les hauteurs barométriques antérieures, celle, H, qui satisfait à cette condition et que l'on distingue parce qu'elle marque la transition entre le régime atmosphérique extérieur irrégulier, instable et indépendant du cyclone, et le régime intérieur du tourbillon, qui s'accuse, d'une façon continue et progressive, à mesure que le centre des dépressions se rapproche de l'observateur. Le commandant fera prendre alors la cape stationnaire à son bâtiment pendant une heure au moins.

A la fin de cette période d'observation des hauteurs barométriques corrigées par le tracé continu de la courbe $H - h = f(t)$ en fonction du temps, on détermine la dernière $h' < h$ et la direction MW′ du vent, dont la vitesse W′ doit être plus grande que celle W observée une heure auparavant.

Ce sont les seules données barométriques :

$$H - h, \qquad H - h'$$

et les directions

$$MW \quad \text{et} \quad MW'$$

du vent, se rapportant à l'origine et au terme de la période de stationnement et d'observation, que l'on utilise pour la détermination de la route de sécurité du navire par la construction (α). L'angle Ω donné par cette construction est un bon élément indicateur de cette route, car, étant fort peu influencé par les erreurs commises sur la valeur de H dans la mesure par la table (v) des vitesses giratoires v et v' proportionnelles à $\sqrt{H-h}$ et à $\sqrt{H-h'}$ et, par suite, sur la direction de la droite Wω' qui dépend, pour un même angle WOW', des baisses barométriques ($H-h$) et ($H-h'$), à cause de la compensation partielle qui se produit entre ces erreurs.

Il est intéressant de remarquer, au point de vue météorologique, que la vitesse du vent peut être déduite indirectement de la construction (α), avec une précision qu'on ne pourrait obtenir par des mesures directes, à cause des rafales incessantes et des difficultés d'installation et de réglage d'un anémomètre en haut d'un mât des navires.

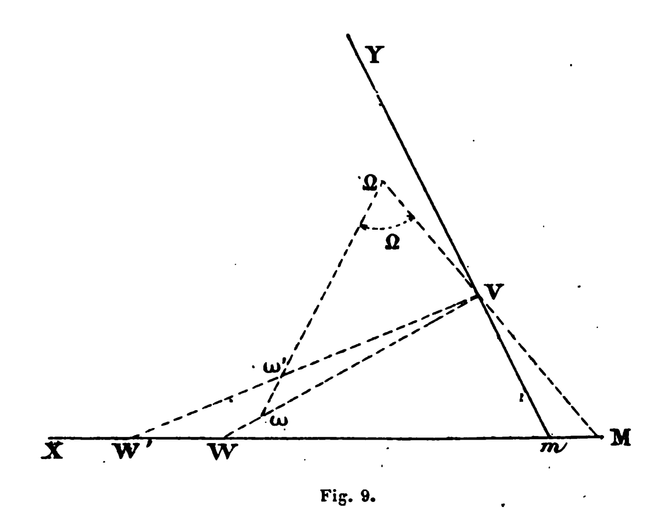


Fig. 9.

Variante de la construction (α).

21. Pour éviter l'usage d'une table donnant les valeurs numériques du rapport $\frac{H-h}{H-h'}$, on déterminera le tracé de la droite coupant

MV sous l'angle Ω dans la construction (α), en portant simplement :

$$\text{sur VW, une longueur } V\omega = 20^{mm} . (H - h'),$$

et (*fig.* 9)

$$\text{sur VW}', \text{une longueur } V\omega' = 20^{mm} . (H - h),$$

20^{mm} étant une échelle arbitraire mais de grandeur convenable, et en joignant $\omega\omega'$ par une droite (*fig.* 9), dont l'incidence sur MV sera l'angle cherché Ω.

Tel est le procédé que nous proposons d'employer dans les cyclones pour mettre fin à l'indécision des navigateurs, dans le cas de la fixité apparente de la direction du vent qui rend inapplicables les règles actuelles.

Vice-amiral E.-F. Fournier,

Membre du Conseil supérieur de la Marine
et du Bureau des Longitudes.

PARIS. — IMPRIMERIE E. CHAPELOT ET Cie, 2, RUE CHRISTINE.




JUN 25 1904

